

# 深水浅层浅水流灾害风险评价与防灾方法研究

申屠俊杰<sup>1,2</sup>, 林伯韬<sup>1,2,3\*</sup>, 陆吉<sup>1,2,3</sup>

1 中国石油大学(北京)油气资源与探测国家重点实验室, 北京 102249

2 中国石油大学(北京)石油工程学院, 北京 102249

3 中国石油大学(北京)人工智能学院, 北京 102249

\* 通信作者, linb\_cupb@163.com

收稿日期: 2020-05-11

国家科技重大专项(2017ZX05009-003)和中国石油大学(北京)科研启动基金项目(ZX20200120)联合资助

**摘要** 随着全球能源需求日益增加, 海洋油气资源, 尤其是深水资源成为了新一轮的勘探开发热点。深水油气资源具有储量高、潜力大、探明率低的特点, 但同时也伴随着浅层地质灾害等陆上钻井不曾面临的问题。浅水流灾害是一种频繁的浅层地质灾害, 其实质为深水浅层发育的超压砂体, 主要由地层中快速沉积和不平衡压实作用形成。浅水流灾害破坏力大、分布区域广, 对井壁、套管、井口等均有影响, 严重破坏井筒完整性。本文首先阐述浅水流灾害的概念、危害及主要成因, 其次总结了浅水流的识别预测技术、风险评价方法及相关防控措施, 最后提出了风险评价及综合防灾方法。浅水流的识别与预测方法主要有测井法和反射地震法两种, 其中反射地震法是最常用的方法, 主要通过  $V_p/V_s$  值的异常变化实现浅水流超压砂体的识别。目前, 浅水流灾害的风险评价工作侧重于钻前预测, 以定性判断为主, 缺乏定量分析, 但近年来涌现的实验及数值模拟研究正不断填补这块空白。浅水流的预防和控制作业主要包括井控措施和工作液体系优化。本文综合了现阶段浅水流灾害的风险预测及评价工作, 提出一套新的风险评价体系, 并将风险评价体系与防灾措施相结合, 形成动态防灾方法。该防灾方法可合理规划浅水流区域钻井作业施工, 并将风险评价方案与应对机制有机结合, 并且可在作业过程中不断优化方案, 从而提高钻井作业的灵活性和防灾能力。最后, 本文展望了浅水流灾害防灾工作的发展趋势, 认为浅水流流动破坏机制的基础研究、地球物理识别技术的发展及人工智能技术的应用将是今后的研究热点和重点。

**关键词** 地质灾害; 浅水流; 防灾方法; 风险评价; 机器学习

## Research on risk assessment and prevention methods of shallow water flow hazards in deep-water and shallow areas

SHENTU Junjie<sup>1,2</sup>, LIN Botao<sup>1,2,3</sup>, LU Ji<sup>1,2,3</sup>

1 State Key Laboratory of Petroleum Resources and Prospecting, China University of Petroleum-Beijing, Beijing 102249, China

2 College of Petroleum Engineering, China University of Petroleum-Beijing, Beijing 102249, China

3 College of Artificial Intelligence, China University of Petroleum-Beijing, Beijing 102249, China

**Abstract** With the continuous increase in global energy demand, offshore oil & gas resources, especially deep-water oil & gas

引用格式: 申屠俊杰, 林伯韬. 深水浅层浅水流灾害风险评价与防灾方法研究. 石油科学通报, 2021, 03: 451-464

SHENTU Junjie, LIN Botao, LU Ji. Research on risk assessment and prevention methods of shallow water flow hazards in deep-water and shallow areas. Petroleum Science Bulletin, 2021, 03: 451-464. doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2021.03.036

resources, have become new development hotspots. The deep-water oil & gas resources are characterized by high reserves, great potential and low exploration rates, but they are also accompanied by shallow geological hazards and other problems that onshore drilling works have never faced. Shallow water flow (SWF) is a common geological hazard, which is essentially the over-pressured sand section developed in the deep water and shallow areas and mainly formed by rapid deposition and unbalanced compaction in the formation. SWF hazards have large destructive power and wide distribution areas, which have influence on the borehole, casing and wellhead, and can seriously damage the integrity of the wellbore. In this paper, the concept, harm, and main causes of SWF hazards are firstly expounded. Then the identification and prediction technology, risk assessment methods, prevention, and control measures of SWF hazards are summarized. Finally, risk assessment and comprehensive prevention methods are put forward. It is concluded that the identification and prediction methods of SWF hazards mainly include logging and reflection seismic methods. Among these, the reflection seismic method is adopted more commonly in practice, which recognizes the overpressure sand body by the abnormal fluctuations of the value of  $V_p/V_s$ . At present, the risk assessment of the SWF hazards places more emphasis on the pre-drilling prediction and qualitative judgment but lacks quantitative analyses. However, experimental and numerical simulation studies have been constantly filling this gap in recent years. The prevention and control operations of SWF hazards include well control measures and working fluid system optimization. Based on current work of the risk prediction and assessment of the SWF hazards, a new risk assessment system is proposed and then combined with disaster prevention measures in this study, proposing a dynamic hazard prevention method. This hazard prevention method reasonably plans the drilling operations in SWF areas, combines the risk assessment scheme with the response mechanism, and continuously optimizes the drilling scheme during the drilling operation to improve the flexibility of drilling operations and enhances the hazard prevention ability. Finally, the development trends of SWF hazard prevention are examined. It is considered that basic research into the flow failure mechanism of the SWF hazards, the development of geophysical identification technology, as well as the application of artificial intelligence technology (AIT) will be the research emphases in the future.

**Keywords** geological hazard; shallow water flow; hazard prevention methods; risk assessment; machine learning

**doi:** 10.3969/j.issn.2096-1693.2021.03.036

## 0 引言

随着全球经济的快速发展以及工业技术的持续进步,能源需求量也在不断增加。近些年来,世界油气资源勘探开发不断深入,陆上油气资源勘探已相对成熟,对全球油气储量的增长贡献值较低<sup>[1]</sup>。海洋油气资源具有潜力大,探明率低的特点,自2000年以来,海上油气探明储量及产量持续增长并赶超陆上,已逐渐成为全球油气资源的战略接替区<sup>[2]</sup>。同时,海洋油气开发也向着“深海、深层、非常规”的目标不断前进。近10年油气新发现中74%为海洋油气资源,其中深水油气资源占23%,超深水油气资源占36%,深水油气日产量达到1030万桶/日。目前世界上已形成“两竖一横”的3个深水勘探热点地区,即环大西洋、东非东部大陆边缘和新特提斯盆地西段,深水地区已成为未来油气资源勘探与开发的主战场<sup>[3-6]</sup>。

然而,由于深水环境的特殊性,深水钻探作业面临着比陆上更为严峻的挑战,由地质灾害引起的钻井事故屡见不鲜。深水浅层地质灾害是深海钻探作业中最常见,也是造成影响和破坏最大的问题,包括浅层气、浅水流和天然气水合物等,其中又以浅水流灾害

最为严重,也最受关注<sup>[7]</sup>。浅水流灾害是指深水浅层区域发育的超压砂体。超压砂体触发后极易导致井底压力失衡,高速砂水流侵入井筒,对钻井作业产生极大危害。深水之星海底技术委员会(DeepStar)认为浅水流灾害是墨西哥湾深水钻井所面临的最严重的问题之一<sup>[8]</sup>;Fugro地质服务公司的报告显示全球70%的深水井都遭遇过浅水流灾害<sup>[9]</sup>。墨西哥湾的一项调查表明,位于浅水流灾害发育地区的106口井在浅水流灾害防治措施上共花费1.75亿美元,平均单井花费160万美元<sup>[10,11]</sup>。

我国深水油气资源开发方兴未艾,南海地区油气资源储量占全国总量的三分之一,其中深海储量占70%,具有巨大的开采价值。目前,南海的钻探作业中也已发现了浅水流灾害的形成<sup>[7]</sup>。为保证深海油气资源的经济安全开采,必须重视浅水流灾害问题,做好预测和防治工作。

## 1 浅水流灾害基础研究

### 1.1 浅水流灾害的基本概念及危害

“浅水流”(Shallow Water Flow, SWF)是指出现异

常高压的深水浅层未固结砂体,属于常见的浅层地质灾害。当钻遇异常高压砂体或在异常高压层位处进行固井操作时,由于井底压力失衡,砂水流在高压驱动下进入井眼,对井壁、套管及井口装置等造成侵蚀,严重破坏井筒完整性<sup>[7, 12-14]</sup>。如图1所示。需要注意的是,浅水流通常发生在深海区域内,由于异常高压砂体发育在泥线下相对水深较浅的范围内,故用“浅”来描述<sup>[15]</sup>。目前业界对于深水浅层的具体范围的界定仍未统一,国内外不同学者对深水浅层的概念有着不同的解释,在综合已有文献的基础上<sup>[7, 12, 14]</sup>,可将深水浅层界定为水深400 m以下,泥线下250~1000 m范围内。浅水流的形成一般需要满足3个主要条件<sup>[16]</sup>:疏松、未固结的砂质沉积物,低渗透率的泥质封闭层以及异常高压。异常高压是指砂体的孔隙压力高于埋深处的静水压力值,有效应力小于正常值的现象。异常高压亦称超压,超压状态可通过超压比率来描述<sup>[17]</sup>,其表达式为

$$\lambda^* = \frac{P - P_h}{\sigma_v - P_h} \quad (1)$$

其中, $P$ 为流体压力,MPa; $P_h$ 为静水压力,MPa, $\sigma_v$ 为上覆压力,MPa。当地层完全排水,不存在超压时,流体压力等于静水压力,即 $P=P_h$ , $\lambda^*=0$ ;当地层完全不排水,地层严重超压时,流体压力等于上覆压力,即 $P=\sigma_v$ , $\lambda^*=1$ 。

浅水流灾害对钻井作业造成的影响和破坏极大,主要体现在以下几个方面<sup>[10, 11, 14, 18-21]</sup>:

(1) 磨蚀套管或使其受力不均匀,造成套管屈曲报

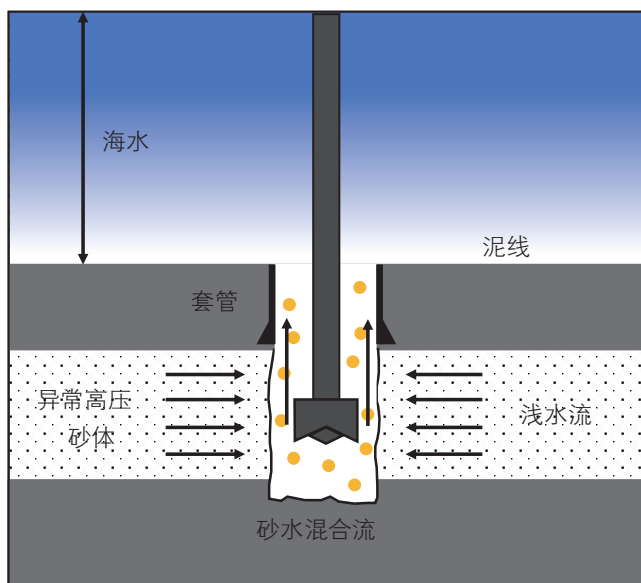


图1 浅水流灾害示意图

Fig. 1 Schematic diagram of SWF hazard

废;

(2) 侵蚀井壁,在超压砂层处形成展布的空穴,造成井眼扩大甚至井壁坍塌;

(3) 造成固井窜槽,影响固井质量;

(4) 冲刷出的泥砂在井口堆积,掩埋井口其报废;

(5) 超压砂体液化流动导致地层承载力降低,造成海底结构物塌陷;

(6) 延长钻井作业时间,增加了施工成本。

## 1.2 浅水流灾害形成原理

目前最常见,也是破坏性最大的诱因便是原生超压砂体,属于原生理理<sup>[10, 11, 14, 20, 21]</sup>,这种由地质成因造成的超压砂体超压程度更高。除原生超压砂体之外,一些次生理理也是引发浅水流的潜在因素,如次生裂缝、次生压力储存以及固井窜槽引起异常压力传递等<sup>[21-22]</sup>。但这些由人为引起的浅水流一般超压程度较低,对钻井作业的影响较小。

研究表明,超压砂体具有多种成因,与地质作用、构造作用和沉积速度等均有关,目前公认的成因有:

(1) 机械不平衡压实作用<sup>[10-11, 20]</sup>

机械不平衡压实作用可简称为压实作用。由压实作用引发的超压砂体较为常见。压实作用通常伴随着快速沉积的特点,墨西哥湾受浅水流严重影响的Mississippi Canyon区块沉积速率达到1 mm/a。根据孔隙水的来源,压实作用又可细分为不平衡压实作用和差异压实作用两种<sup>[22]</sup>。不平衡压实作用是指由于上部物质沉积速度较快,对下部地层的载荷迅速增加,来自下部地层的孔隙水被周围低渗透的泥岩或页岩包围来不及排出,造成孔隙压力增大,有效应力降低,形成异常高压(图2(a))。差异压实作用是指上覆沉积物的厚度不同,对下部地层的载荷有差异,导致较厚沉积下的较高的上覆岩层压力驱使粉砂质页岩中的孔隙水进行横向及向上运移,其中部分横向运移的孔隙水储存于砂体中,从而形成异常高压(图2(b))。浅水流发育区的水动力特征与该区块的沉积作用类型密切相关<sup>[23]</sup>,沉积速率越快,上覆沉积层厚度越大,砂体孔隙压力也就越高。在超压严重的砂体中,沉积的砂砾颗粒近似悬浮状态。

(2) 成岩作用<sup>[16]</sup>

成岩作用的实质是黏土成分的脱水作用与蚀变。当温度达到65~120℃时,在钾长石的催化作用下,蒙脱石转变为伊利石。在这个过程中,蒙脱石的层间水被排出并成为孔隙水,使得孔隙压力升高,有效应

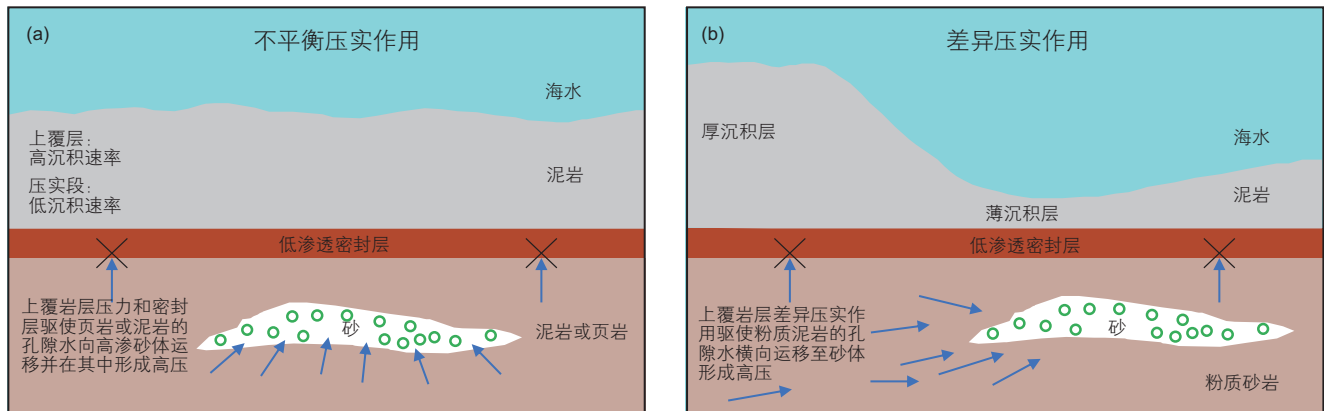


图2 压实作用: (a)不平衡压实作用; (b)差异压实作用(改自Alberty等<sup>[21]</sup>)

Fig. 2 Compaction effect: (a) Unbalanced compaction; (b) Differential compaction (Modified from Alberty et al<sup>[21]</sup>)

力降低,形成异常高压。此外,某些岩石中含有的水分由于快速沉积来不及释放,在埋藏稳定后才逐渐排出,也会形成异常高压。

### (3) 浮力作用<sup>[23]</sup>

浮力作用主要由油气与孔隙水的密度差异造成。若砂体中的孔隙水被油气替换,由于油气与孔隙水存在的密度差,孔隙会在浮力作用下产生一定膨胀,从而导致孔隙内流体压力升高。

### (4) 构造抬升或侵蚀<sup>[11]</sup>

地质构造也会导致浅水流的形成。若地层由于地质构造的变动被快速抬升,从埋深较深处来到浅部地层,且地层封闭性较好,来不及与外界平衡压力。随着孔隙水的膨胀,将会形成异常高压。此外,若地质构造使得地层发生倾斜,砂体重心位置发生变化从而导致砂体内部各部分间应力失衡,导致异常高压的产生。

### (5) 水热增压作用<sup>[24]</sup>

水热增压作用主要由孔隙流体和周围岩石骨架的热膨胀系数的差异造成。随着地层的埋深逐渐增加,地层温度也不断增大,孔隙流体受热膨胀并导致异常高压。

### (6) 天然气水合物分解<sup>[15, 25-26]</sup>

研究表明,浅水流产生的水以淡水为主,这与浅水流砂体的沉积环境不符,而天然气水合物的分解产物中含有大量淡水,同时水合物分解时的体积膨胀也是破坏砂体结构,产生异常高压的潜在因素。此外,天然气水合物发育区域与浅水流灾害区域的位置大致重合,且钻遇水合物层后,水合物分解以及浅水流发生都具有一定的时间滞后等现象也都证明了天然气水合物分解这一成因的合理性。

## 2 浅水流灾害识别及预测技术

### 2.1 浅水流砂体岩石物理特征及识别标志

浅水流砂体通常表现出疏松、未固结、高渗透率、高孔隙度、分选性较差的特点,砂体颗粒之间几乎不存在胶结。从地应力的角度来说,高孔隙压力和低有效应力使得砂体颗粒近乎悬浮在地层流体中,地层呈现出近似流体的性质,具有抗压不抗剪的特点。地震波通过浅水流砂体时,纵波速度 $V_p$ 和横波速度 $V_s$ 均发生下降,但横波速度的降幅比纵波更大,因此在地球物理属性上表现出高 $V_p/V_s$ 值和高泊松比的特点<sup>[9, 27]</sup>。对于典型的浅水流砂层,其 $V_p/V_s$ 值至少可达到10的数量级,泊松比大于0.49。

综合浅水流砂体的发育环境、岩石物理特征及地球物理属性,其识别标志可归纳为以下几点<sup>[13-14]</sup>:

(1)合理的埋存位置:目标砂体位于水深400 m以下,泥线下250~1000 m范围内,属于浅水流的发育深度;

(2)属于快速沉积区:目标砂体所在的区域沉积速度较高,一般大于1 mm/a;

(3)砂体被低渗透层覆盖:低渗透层能阻止砂体排水泄压,是形成超压砂体的必要条件;

(4) $V_p/V_s$ 值较大: $V_p/V_s$ 值是判定存在异常高压的主要依据。

### 2.2 浅水流砂体预测方法

#### 2.2.1 测井法

测井法包括随钻测量(MWD)、随钻测压(PWD)、钻后测井以及垂直地震剖面(VSP)测井等方法。在考

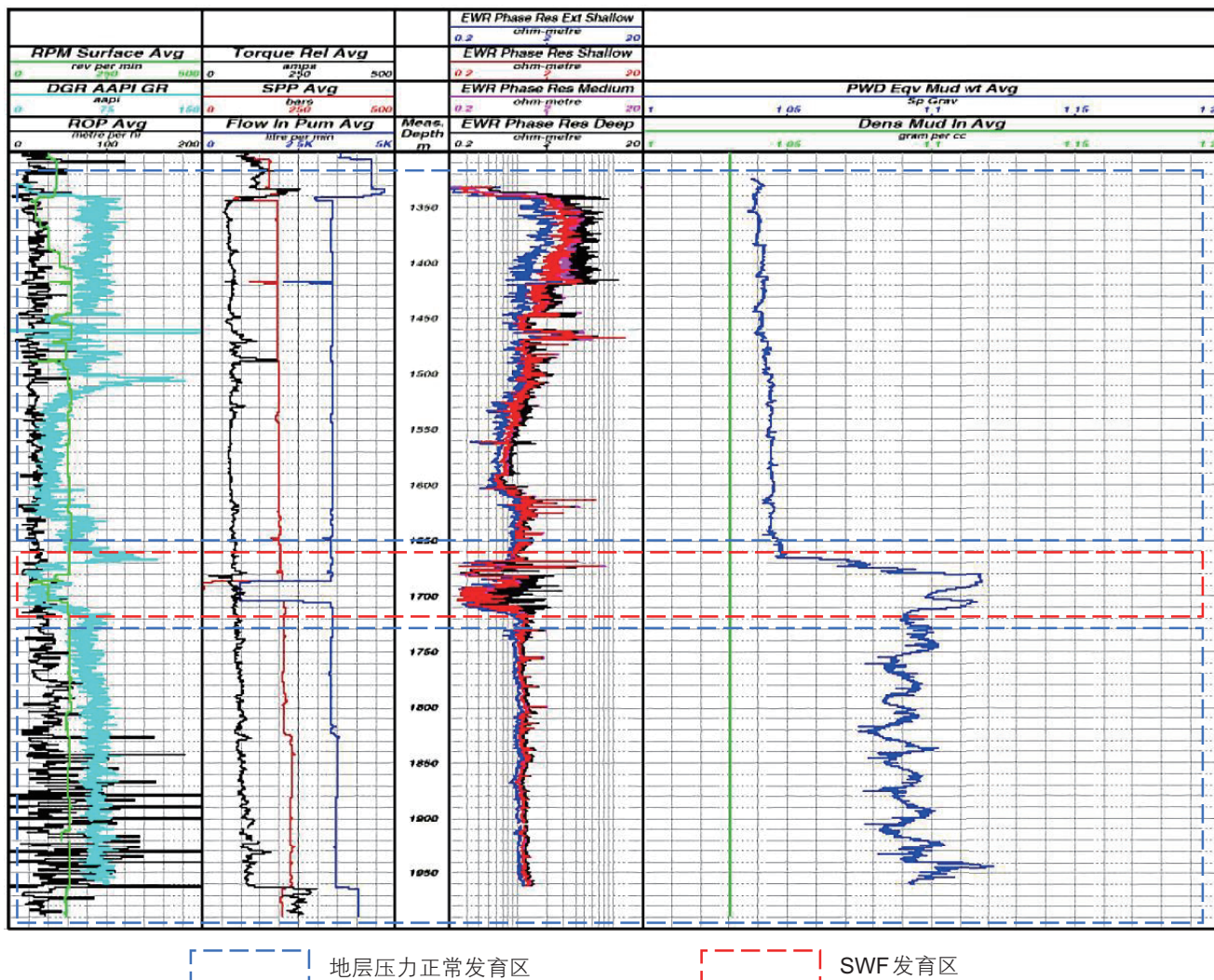


图3 PWD对浅水流灾害响应( 改自 Cameron<sup>[12]</sup>)  
 Fig. 3 Response of PWD to the SWF hazard (Modified from Cameron<sup>[12]</sup>)

虑成本及安全性的基础上，深水的特殊环境对测井方法和装备的优选提出了难题。目前应用较广泛的测井方法为MWD和PWD。图3为PWD方法在浅水流发育区域的响应示意图，可以看出测深1650~1700 m处平均当量泥浆密度(PWD Eqv Mud wt Avg)发生突变，显示该深度发育有异常高压砂体，即存在浅水流灾害的潜在风险。此外，墨西哥湾在进行实际操作后，还提出了伽马射线测量、多传感器电阻率测量等MWD方法<sup>[11]</sup>。在实际应用中，测井法通常与反射地震法配合使用，以达到最优化预测效果。在墨西哥湾Ursa区块的深水钻井操作中，PWD和LWD方法应用于钻井全阶段，保证了钻井作业安全进行<sup>[28, 29]</sup>。在Garden Banks区块的磁力影响区，陀螺随钻(GWD)的应用代替MWD为钻井操作提供了定向控制和风险预测<sup>[30]</sup>。此外，VSP测井资料还可用于标定地震波速度场，减

小预测结果误差<sup>[31]</sup>。

### 2.3.2 反射地震法

反射地震法属于钻前预测方法，具有经济有效、预测精度高的优势，也是目前最常用的方法。在缺少邻井资料的情况下，地震资料是预测浅层地质灾害的唯一可行方法。利用地震速度预测浅水流的步骤主要包括：(1)获取地震速度；(2)校正地震速度；(3)关联地震速度与岩石速度；(4)建立岩石模型，将速度与有效应力、孔隙度相关联；(5)根据地震速度和岩石模型获得地应力信息。

在利用反射地震法预测浅水流时， $V_p/V_s$ 值是帮助识别浅层地质灾害以及辨别灾害类型的有效依据之一<sup>[27, 32]</sup>。浅水流灾害于1985年首次被发现。在过去的深水钻探实践中，国外已形成了较为成熟的基于地震振幅资料的浅水流预测方法。浅水流的预测一般通过

高质量的3D地震勘测资料与2D高分辨率地震勘测资料来实现<sup>[33-34]</sup>。在墨西哥湾的钻井实践中,操作人员通过3D地震资料发现了在较大面积中发育的连续砂体,随后经过2D地震详探,进一步发现了带有密封层的断块砂体,从而成功预测到浅水流的发育<sup>[35]</sup>。相比于常规3D地震资料,高分辨率地震资料能更好地地区分地震相和沉积特征。王海平等<sup>[36]</sup>、周波等<sup>[37]</sup>利用高分辨率地震资料分别对渤海、西非某区块以及南海荔湾深水海域进行了浅层地质灾害预测分析,取得了良好的预测效果。

根据地震振幅资料获得纵横波速度比等有效信息是浅水流超压砂体预测中的关键步骤,为了提高地震速度场拟合的精确性,研究人员提出了多种反演方法。Mallick等<sup>[38]</sup>根据AVO(振幅随炮检距的变化)原理和遗传算法,提出了一种基于常规3D地震资料及岩石模型的叠前反演方法。该方法能够准确描述 $V_p$ 、 $V_s$ 、泊松比、体密度等地层信息并根据由此准确识别浅水流砂体。如图4所示,图4(a)中声波速度、地层岩石密度和泊松比在同一位置处产生较大偏移,由此可判断浅水流该处存在浅水流超压砂体发育;图4(b)中某几个深度的地层处 $V_p/V_s$ 值出现异常峰值,在与邻井资料进行对比后,也可确定浅水流超压砂体在相应地层处的发育情况。Lu等<sup>[39]</sup>通过对3D地震资料进行弹性反演,得到纵横波速比等信息。将该反演结果与邻井资料以及Fugro公司所做出的预测结果进行对比后,发现该反演结果中 $V_p/V_s$ 值的异常显示处与实际的浅水

流发育层位吻合良好。Dutta等<sup>[40]</sup>通过全波形叠前反演得出墨西哥湾Clastic Tertiary盆地某区域的孔隙压力和泊松比剖面,为岩性预测和地质灾害评估提供了依据。吴时国等<sup>[41]</sup>基于高分辨率的2D和3D数据,采用了混合地震反演方法。该方法将叠前反演和叠后反演进行了有效结合,能够对较大地震数据体进行弹性反演,从而获得浅水流预测所需的各种参数。在对南海北部白云凹陷实施地震勘测后,发现反演结果与深水水道砂体局部发育位置具有很好的叠合关系。此外,Dix反演方法<sup>[42]</sup>、层析反演方法<sup>[43]</sup>等也能有效地从地震资料中拟合得到速度场信息,为浅水流预测提供合理依据。

### 3 浅水流灾害风险评估方法

深海浅层地质灾害的风险评价工作需要系统地对其潜在的灾害类型及其可能造成的影响进行评估,并对其发生概率及危害性进行定量预测。“全球科学”及“全球系统科学”概念的融入则使得深海地质灾害评价工作更系统化,更符合全球化、多学科融合的要求和趋势<sup>[44-45]</sup>。

#### 3.1 浅水流灾害风险评估的必要性

深海地质灾害的风险评价工作具有其必要性,在实际生产过程中,根据问题的严重程度不同将会采取不同的策略,从而最大限度地减少钻井和经济

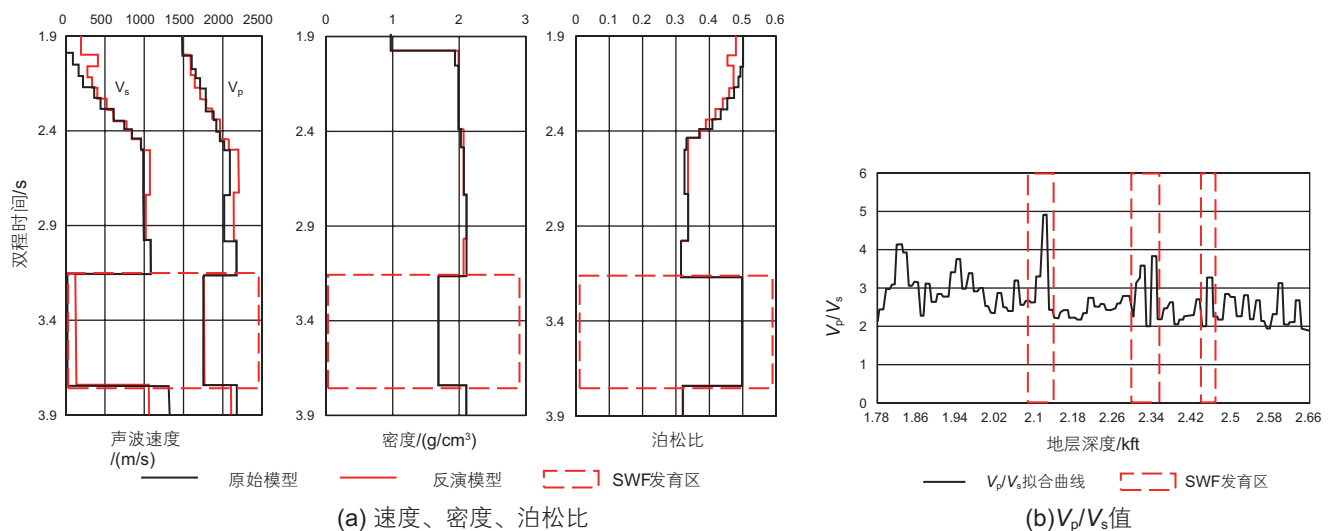


图4 叠前地震反演结果及浅水流区域识别:(a)速度、密度、泊松比;(b) $V_p/V_s$ 值;(改编自Mallick等<sup>[38]</sup>)

Fig. 4 Pre-stack seismic inversion results and identification of the SWF area: (a) Velocity, Density, Poisson's ratio; (b)  $V_p/V_s$  value (Modified from Mallick et al<sup>[38]</sup>)

损失。以浅水流灾害为例,轻微的浅水流对钻井作业几乎无影响,而严重的浅水流则会对钻井操作和工具造成极大影响,甚至致使油井报废。一项调查显示,在墨西哥湾的74口深水井中,仅有9口井因浅水流问题未能完钻,占12%;39口井曾钻遇浅水流,但在采取相应措施后仍钻至目标层位,占53%。如表1所示。

因此,浅水流灾害的预测及评价作业不应局限于超压砂体位置等信息的获取,更需要结合实测信息与物理模型对浅水流灾害可能达到的危害程度进行预估。完善且准确的风险评价,有利于油井顺利完钻,节省时间、人力、装备等成本。

### 3.2 浅水流灾害风险评价模型研究

随着室内实验条件和数值模拟技术的不断发展,近年来已有一些研究从不同角度对浅水流灾害的风险开展了定量分析,并建立了相关风险评价模型。Ren等<sup>[47]</sup>建立了模拟浅水流上喷的两相流数值模型,并进一步分析典型工况下超压砂体孔隙压力、规模、孔隙度及钻速等因素对砂水流喷出速率的影响,其结果表明超压程度的小幅度增长可导致砂水喷出量剧烈增加。孙金等<sup>[48]</sup>针对浅水流灾害引起的井眼坍塌问题,提出了基于流固耦合理论的井眼稳定数值模型,并分别根据Mohr-Coulomb准则和最大拉应力准则判断砂体破坏模式,研究井周最大破坏半径的影响因素。研究结果表明超压程度、砂体埋深、地应力及内摩擦角等因素对井眼坍塌均存在一定影响。季雯宇等<sup>[49]</sup>在固液两相流和冲蚀理论的基础上,提出了三维流场模型,并开展了砂水流对套管环空冲蚀率的数值模拟研究,并揭示了流速、质量流率、粒径等因素对冲蚀率的影响。Gao等<sup>[50]</sup>、Wang等<sup>[51]</sup>提出了深水环境下耦合井筒和地层间的热传递模型,考虑环空多相流体流动行为,分析了井筒与地层的温度分布和钻井液传热导致的水合

物的分解,可用于预测水合物分解引起浅层砂体的孔隙压力的动态变化,从而分析出潜在的浅水流灾害风险。

Shi等<sup>[52]</sup>根据浅水流砂体的触发特点,设计并实施了真三轴条件下的超压砂体泄压实验,探究砂体在压力释放过程中的流动及变形机理。实验现象显示压力释放区存在沙砾聚集,且泄压点上下的砂层均向其流动。在其研究基础上,Shentu等<sup>[53]</sup>设计了浅水流砂体流动破坏过程可视化实验装置,并提出了基于流固耦合理论的离散元方法-计算流体动力学(DEM-CFD)数值模型,分析了多种因素对固态砂喷出量的影响。其实验及模拟结果显示砂体超压程度、孔隙度、粒径等均对固态砂喷出量具有一定影响,且影响机制不同。此外,根据实验及模拟所得数据,Shentu等<sup>[53]</sup>选取了某一个数据点作为基准点,对所有数据点进行了归一化处理,获得了初始超压(超静孔隙水压力)、孔隙度、砂砾半径的相对坐标值,如公式(2)~(4)所示。

$$P_D = \frac{P_b}{P_a} \quad (2)$$

$$\phi_D = \frac{\phi_b}{\phi_a} \quad (3)$$

$$R_D = \frac{R_b}{R_a} \quad (4)$$

其中, $P_a$ ,  $\phi_a$ ,  $R_a$ 为基准点所对应的初始超压(MPa)、孔隙度及砂砾半径(mm); $P_b$ ,  $\phi_b$ ,  $R_b$ 为其它各数据点所对应的初始超压(MPa)、孔隙度及砂砾半径(mm); $P_D$ ,  $\phi_D$ ,  $R_D$ 则为各数据点所对应的初始超压(MPa)、孔隙度及砂砾半径(mm)的相对坐标值。利用Shentu等<sup>[53]</sup>通过离散元数值模拟得到的结果数据,将浅水流案灾害例的风险程度与对应超压砂体的相对孔隙度、砂粒半径及初始超压关联,如图5所示。浅水流灾害案例依风险程度由不同颜色及形状的实心

表1 浅水流对墨西哥湾深水井影响情况(改自Alberty等<sup>[20]</sup>)

Table 1 Influence of shallow water on deep-water wells in the Gulf of Mexico (Modified from Alberty et al<sup>[20]</sup>)

影响程度	数量/口	百分比/%
油井报废	9	12
评估受限	1	1
钻遇,但成功完钻	39	53
未发现浅水流	25	34
总计	74	100

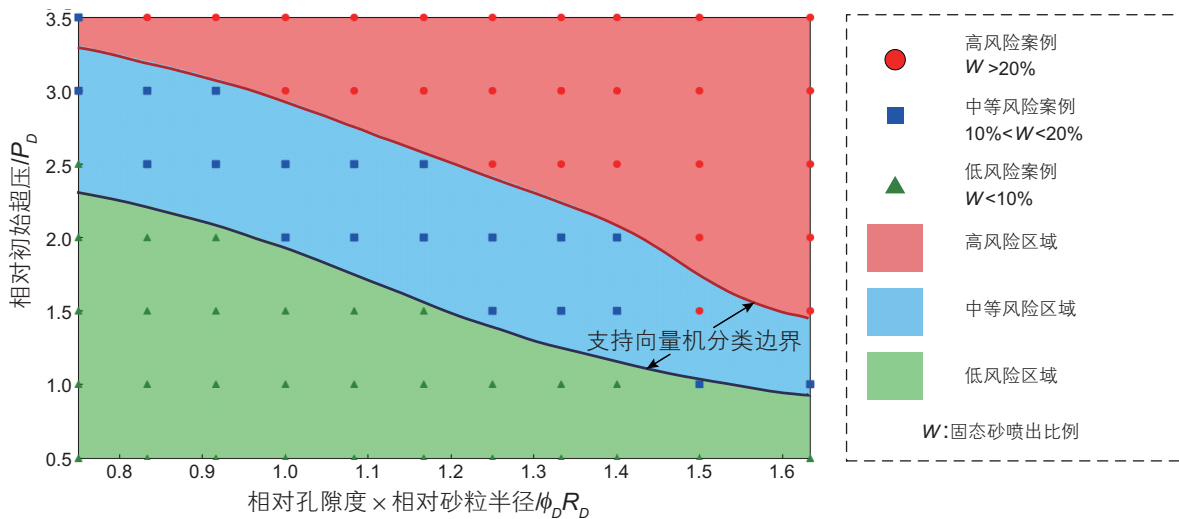


图5 浅水流灾害风险预测图版(数据来自 Shentu 等<sup>[53]</sup>)  
Fig. 5 SWF risk prediction chart (Data from Shentu et al<sup>[53]</sup>)

点表示。进一步地,应用机器学习中的支持向量机(Support Vector Machines, SVM)方法,将三种不同风险程度的数据点分类并划定数据边界(见图5)。SVM方法能够较好地解决小样本、非线性等问题,因此适用于本研究在有限样本条件下进行数据分类操作<sup>[54, 55]</sup>。最终,依托图5所示的预测图版,现场工程人员能够根据估算的超压和测录井获取的孔隙度、砂粒半径,预先判定该区块浅水流灾害的风险程度。

### 3.3 浅水流灾害风险评价方法制定

现阶段浅水流灾害的风险评价工作的重点仍落在钻前预测上,以地震信息和邻井资料为主要依据,形成了一套初步评价钻井风险的工作流程,包含以下步骤<sup>[56]</sup>:(1)地质初探,初步识别潜在浅水流灾害的地形地貌特征(如沉积速度大于1 mm/a的快速沉积区);(2)建立海底观测系统,实时监测勘探开发区域的地质灾害响应情况;(3)地球物理初步评价,利用测井、反射地震等地球物理方法对目标区块进行调查,获取超压砂体位置、压力分布剖面等信息。

本文在现有浅水流灾害风险评价方法的基础上对其进行了改进,提出了一套新的风险评价体系。风险评价工作不只局限在钻前预测上,而应形成一个完整体系并贯穿于钻井作业的始终。新的风险评价方法根据钻井作业时间和环节主要可分为钻前风险预测、钻时风险分析以及钻后信息统计3个部分。

其中,钻前风险预测主要包括地质初探、地震反演信息及邻井资料的分析。初步识别浅水流发育区域

并获得超压砂体发育深度、地层压力剖面等信息,为总体钻井方案的制定提供依据。钻时风险分析主要根据钻进过程中获得的实时参数,如岩屑信息、真实地层压力信息等,结合风险预测模型对浅水流灾害风险做出实时评估和修正,并对钻井方案进行修正。此外,海底实时监测系统也为这一环节工作提供了及时直观的信息。油井完钻后,对钻井信息进行统计和归纳,记录钻进过程中的施工参数变化情况,浅水流灾害的钻遇情况及严重程度等信息,为该区域及其它相似区块的钻井作业提供经验和依据。

## 4 浅水流灾害防控措施及防灾方法

除了钻前勘探与风险预测,钻井作业的实施也是决定深水井是否成功构建的关键因素。浅水流对于钻井作业的影响体现在多方面,包括钻井液密度窗口较窄,磨蚀损坏套管壁面,影响固井质量等。采取针对浅水流问题的预防与控制措施采用适当的技术与工具,是降低浅水流危害程度的有效方法。

### 4.1 井控措施

钻井液密度窗口较窄是浅水流区域钻井作业最显著的特点之一。浅水流超压砂体具有高孔隙压力和低有效应力的特点,其孔隙压力值与破裂压力值非常接近,增加了超压砂层处的井控难度。目前应对浅水流问题的钻井方案有3种,分别是:过平衡钻井并采用隔水管和加重钻井液;无隔水管欠平衡钻井,采用海



水钻井液以及压井液；无隔水管并使用加重钻井液钻井。前两种方法为墨西哥湾Ursa区块所主要采用的方法，但这两种方法都具有局限性：前者可能会压裂地层，破坏地层结构；后者可能增大引发浅水流的概率<sup>[30]</sup>。因此，有必要采取井控措施来保证浅水流区域的正常作业，降低浅水流造成的破坏。

#### 4.1.1 压井方法

在选用无隔水管欠平衡钻井方案进行钻井作业时，需要随时做好应对浅水流的准备，压井措施是能够有效控制浅水流灾害的井控措施之一。当砂水流进入井筒时，应当立即采取压井措施控制砂水流的高速流动并下套管固井。压井液的当量密度高于钻井液，当浅水流砂体压力较高时，可提高压井液注入量到两倍于井筒环空体积<sup>[46]</sup>。需要注意的是，压井液的当量密度及使用量需根据井底压力和地层破裂压力实时调整，精准控制环空液柱压力，以确保控制浅水流的同时不压裂地层。李迅科等<sup>[57]</sup>研制了深水表层动态压井装置，能够真实反映钻井工况并测量数据，根据地面计算机的分析结果控制井下压力。该装置在南海深水井LW6-1-1井的钻井作业中成功应用，取得的良好井控效果。

#### 4.1.2 非常规导管

将高强度的非常规导管下入到浅水流发育层位并固井，能够封堵超压砂层，起到预防浅水流灾害的作用。相较于常规导管，非常规导管的下入深度更深，且安装方法也有区别。常规导管的下入深度一般为120~150 m，通过锤入法下入井中；非常规导管的下入深度可超过500 m，采用钻入法随钻下入井中<sup>[21]</sup>。非常规导管能够预防浅水流灾害并防止套管屈曲<sup>[58]</sup>。研究表明，安装非常规导管是目前处理浅水流问题最为有效的方法<sup>[21]</sup>。

#### 4.1.3 渗透率减损

渗透率减损方法的实质是利用聚合密封剂对超压砂层进行化学封堵，以降低砂水流进入井筒的渗透性。此外，用于封堵砂层的凝胶液在附着凝固后还能提高该层位的结构强度，拓宽钻井液密度窗口，有助于维持井筒完整性，有利于后续的钻进、下套管固井等工作，还能提高固井水泥与井壁间的密封性<sup>[8]</sup>。渗透率减损方法通常选取浅水流发育层上部的某一点作为密封点，将钻头下至该密封点后通过钻头水眼泵注凝胶密封剂。待密封剂凝固后，即可起到封堵砂层、强化地层的效果。凝固时间视凝胶液组分、环境温度以及激活剂含量而定。此外，与该方法配套的钻井液顶替技术和软件监控系统也相继被提出<sup>[59]</sup>。

## 4.2 钻井工作液体系优化

钻井工作液包括钻井液和固井水泥浆等液体，钻井工作液的优选对于浅水流区域的钻井作业具有重要意义。合理的钻井工作液体系能够帮助维持井底压力平衡，控制井筒与地层间的流体交换，保证一定的井壁强度，提升固井质量，防止固井窜槽。

#### 4.2.1 钻井液

理想的钻井液体系能够维持井底压力平衡并为井壁提供化学保护。室内实验和现场经验证明，CaCl<sub>2</sub>钻井液能较好地控制浅水流问题<sup>[60]</sup>。CaCl<sub>2</sub>钻井液不仅能够降低超压砂层渗透率，还有助于保持井眼清洁并防止泥页岩水化。同时，该钻井液体系较为灵活，经特殊处理后能适用于各种情况，且易于操作。其它添加剂，例如树脂、聚合物、硅酸盐等，也可应用于钻井液中，起到强化地层的作用<sup>[61]</sup>。此外，钻井液最好能在现场进行调配，以应对各种突发情况，这也对钻井液体系提出了一定的要求。

#### 4.2.2 固井水泥浆

固井操作和固井质量是有效降低浅水流危害的重要因素。钻遇浅水流的深水井极易发生井涌，且井底温度较低，因此需要特殊设计的固井水泥浆，要求其能够在短时间内固化，且固化后具有一定强度，能抵御高速砂水流的冲击。泡沫水泥是对浅水流发育层进行固井操作的首要选择<sup>[61-63]</sup>。其优点包括：(1)顶替效率大大提升；(2)固化期间体积膨胀率较高，且固化后强度较高，能有效封隔超压砂层；(3)现场作业方便。此外，随着油气工业的不断发展，轻量化泡沫水泥得到发展，该水泥浆体系仅使用液体添加剂和波特兰水泥即可完成，易于在平台上直接配置使用，进一步提升了钻井作业工作效率<sup>[64]</sup>。

## 4.3 浅水流灾害“动态”防灾方法及流程

浅水流灾害的防灾工作需建立在理论研究的基础上，并着眼于现场方案的制定与实施，形成有效的防灾流程及体系。结合上文所述的浅水流风险评价体系与防控措施，本文提出了一套“动态”防灾方法与流程。如图6所示，该防灾流程主要由浅水流灾害风险评估及钻井方案与对策研究两方面构成，其中风险评估工作是钻井方案的制定依据，钻井方案的实施又为下阶段的风险评估工作提供了信息。两者互为依据，相互补充，贯穿于钻井作业的全过程，并且在不同阶段都能反映当前实际情况并做出对策，形成一套动态的防灾机制。

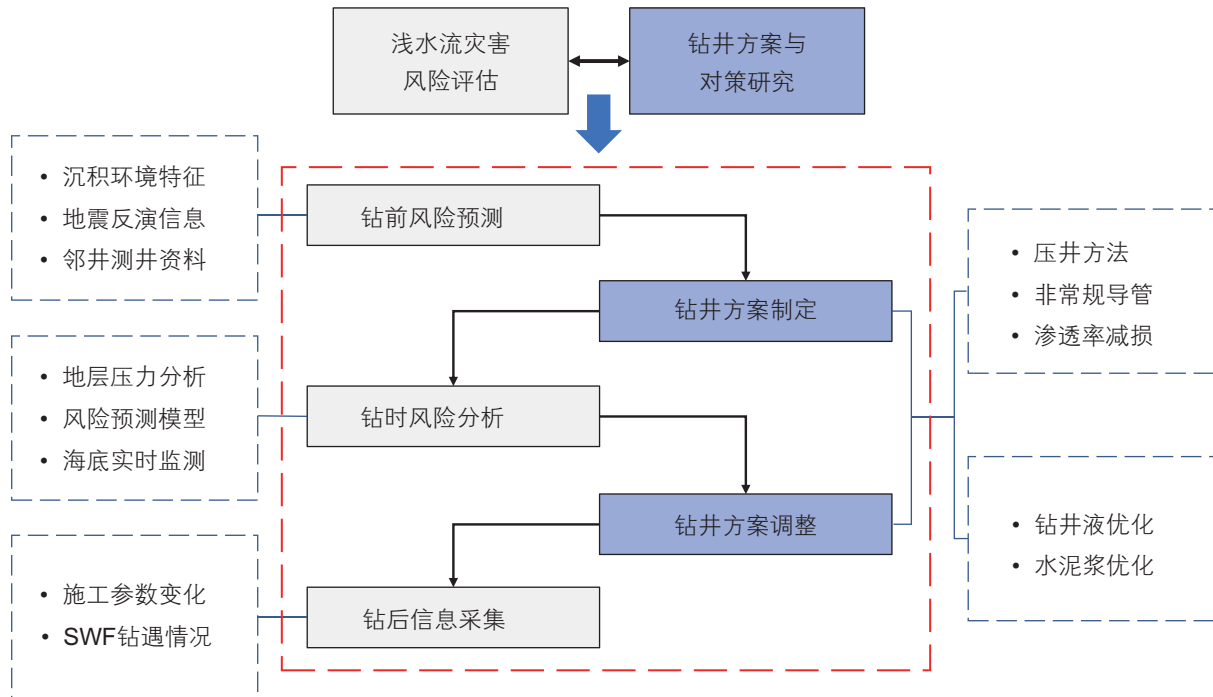


图6 浅水流灾害“动态”防灾流程

Fig. 6 “Dynamic” process of the SWF hazard prevention

## 5 结论与展望

浅水流灾害是深海钻探作业中最常见,也最严重的浅层地质灾害之一,对石油工业造成了巨大损失和影响。我国南海深水区的石油开发工作中也发现了浅水流的存在,为保证勘探和开发工作的顺利进行,必须重视浅水流灾害问题,采取适当的防灾策略与风险评估方案。本文总结了国内外对浅水流灾害的研究结论,介绍了浅水流灾害的概念、主要成因、识别与预测技术、预防及控制方法等内容,同时提出了新的风险预测评价方案及防灾流程,得到结论如下。

浅水流灾害的实质是异常高压的深水浅层未固结砂体,其主要成因是快速沉积和机械不平衡压实作用。目前对浅水流灾害进行识别与预测的方法主要有测井法和反射地震法两种。反射地震法是最常用的方法,主要通过 $V_p/V_s$ 值的异常变化实现浅水流超压砂体的识别。浅水流灾害的风险评价作业在作业现场还处于较为粗糙的、以经验为主的阶段。目前广泛应用的风险评估方法以钻前预测为主,缺乏整体性和延续性。近年来涌现的浅水流灾害相关的室内实验与数值模拟研究为浅水流风险评价工作提供了良好的理论依据,需要不断推动该项工作的发展和完善。本文提出了一

套新的浅水流风险体系,将风险评价工作贯穿于钻井作业的全过程。

浅水流灾害的预防和控制作业主要包括井控措施和工作液体系优化,是浅水流区域钻井作业方案的重要组成部分。通过结合该风险评价体系与相关预防控制技术相结合,提出一套“动态”防灾方法与流程,能够有效提高浅水流区域钻井作业的质量与安全性。

结合以上内容与浅水流灾害防灾方法的研究现状,提出如下展望:

(1)加强浅水流流动破坏机制基础研究。超压砂体结构失稳所伴随的流动破坏是浅水流灾害最显著的特征之一,明确超压砂体的临界物理特征、力学强度、压力条件与浅水流强度关系等特性,对浅水流灾害的防止工作具有重要意义。

(2)发展地球物理识别技术。地球物理信息是浅水流灾害预测工作的重要依据,高精度、大范围的地震勘测技术将极大地推动浅水流灾害预测的进步;详实、准确的地震反演信息能为钻井方案的制定和调整提供重要指导。

(3)拓宽人工智能的应用。人工智能技术的引入对浅水流风险评价工作具有重大意义,能够增强评价结果的全面性和可靠性<sup>[65-67]</sup>。利用人工智能及大数据技

术, 可对三维地震数据和测井资料实现快速精细解释和智能识别。基于机器学习方法, 可有效划分数据类型, 获取数据边界并预测数据走势。此外, 通过大数据分析, 可快速分析现场工况并调整作业方案。

## 参考文献

- [1] 江文荣, 周雯雯, 贾怀存. 世界海洋油气资源勘探潜力及利用前景[J]. 天然气地球科学, 2010, 21(06): 989-995. [JIANG W R, ZHOU W W, JIA H C. Potential of global offshore petroleum resource exploration and utilization prospect[J]. Natural Gas Geoscience, 2010, 21(06): 989-995.]
- [2] 吴林强, 张涛, 徐晶晶, 等. 全球海洋油气勘探开发特征及趋势分析[J]. 国际石油经济, 2019, 27(03): 29-36. [WU L Q, ZHANG T, XU J J, et al. Characteristics and trends of global offshore oil and gas exploration and development[J]. International Petroleum Economics, 2019, 27(03): 29-36.]
- [3] 刘小兵, 贺正军, 计智锋, 等. 全球油气勘探形势分析与发展建议[J]. 石油科技论坛, 2018, 37(06): 48-52. [LIU X B, HE Z J, JI Z F, et al. Situation analysis and development suggestion of global oil and gas exploration[J]. Petroleum Technology Forum, 2018, 37(06): 48-52.]
- [4] 鲁东侯. 深水油气: 全球油气的接替者[J]. 能源, 2020(01): 87-89. [LU D H. Deepwater oil and gas: Successor of the global oil and gas[J]. Energy, 2020(01): 87-89.]
- [5] 吴时国, 袁圣强. 世界深水油气勘探进展与我国南海深水油气前景[J]. 天然气地球科学, 2005(06): 693-699+714. [WU S G, YUAN S Q. Advance of exploration and petroleum geological features of deep-water hydrocarbon in the world[J]. Natural Gas Geoscience, 2005(06): 693-699+714.]
- [6] 张功成, 屈红军, 张凤廉, 等. 全球深水油气重大新发现及启示[J]. 石油学报, 2019, 40(01): 1-34+55. [ZHANG G C, JU H J, ZHANG F L, et al. Major new discoveries of oil and gas in global deepwaters and enlightenment[J]. Acta Petrolei Sinica, 2019, 40(01): 1-34+55.]
- [7] 吴时国, 谢杨冰, 秦芹, 等. 深水油气浅层钻井的“三浅”地质灾害[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2014, 41(09): 38-42. [WU S G, XIE Y B, QIN Q, et al. Shallow drilling geological disasters of oil and gas in deepwater[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2014, 41(09): 38-42.]
- [8] NATIONS J F, Medley Jr G H. DeepStar's evaluation of shallow water flow problems in the gulf of mexico[C]. Offshore Technology Conference, Houston. Texas, May 5-9, 1997, OTC 8525.
- [9] HUFFMAN A R, CASTAGNA J P. The petrophysical basis for shallow-water flow prediction using multicomponent seismic data[J]. The Leading Edge, 2001, 20(9): 1030-1052.
- [10] ALBERTY M W. Shallow water flows: A problem solved or a problem emerging[C]. Offshore Technology Conference, Houston, Texas, May 1-4 2000, OTC 11971.
- [11] OSTERMEIER R M, PELLETIER J H, WINKER C D, et al. Dealing with shallow-water flow in the deepwater Gulf of Mexico[J]. The Leading Edge, 2002, 21(7): 660-668.
- [12] CAMERON C. Controlling shallow water flows in deep water[C]. Offshore Mediterranean Conference and Exhibition, Ravenna, Italy, Mar 16-18, 2005.
- [13] 刘志斌, 郝召兵, 伍向阳. 深水钻探面临的挑战: 浅水流灾害问题[J]. 地球物理学进展, 2008(02): 552-558. [LIU Z B, HAO Z B, WU X Y. Shallow water flow hazard: A challenge in deepwater drilling[J]. Progress in Geophysics, 2008(02): 552-558.]
- [14] 张辉, 高德利, 刘涛, 等. 深水钻井中浅层水流的预防与控制方法[J]. 石油钻采工艺, 2011, 33(01): 19-22. [ZHANG H, GAO D L, LIU T, et al. Prevention and control methods for shallow water flow in deepwater drilling[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2011, 33(01): 19-22.]
- [15] HARDAGE B A, REMINGTON R, ROBERTS H H. Gas hydrate-A source of shallow water flow?[J]. The Leading Edge, 2006, 25(5): 634-635.
- [16] 董冬冬, 赵汗青, 吴时国, 等. 深水钻井中浅水流灾害问题及其地球物理识别技术[J]. 海洋通报, 2007(01): 114-120. [DONG D D, ZHAO H Q, WU S G, et al. SWF problem in deepwater drilling and its geophysical detection techniques[J]. Journal of Marine Science Bulletin, 2007(01): 114-120.]
- [17] DUGAN B, FLEMINGS P B. Pore pressure prediction from stacking velocities in the eugene island 330 field (offshore louisiana): topical report number 6 (November 1, 1997-June 1, 1998)[M]. Des Plaines: Gas Research Institute, 1998.
- [18] 孙宝江, 曹式敬, 李昊, 等. 深水钻井技术装备现状及发展趋势[J]. 石油钻探技术, 2011, 39(02): 8-15. [SUN B J, CAO S J, LI H, et al. Status and development trend of deepwater drilling technology and Equipment[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2011, 39(02):

- 8-15.]
- [19] 孙宝江, 张振楠. 南海深水钻井完井主要挑战与对策[J]. 石油钻探技术, 2015, 43(04): 1-7. [SUN B J, ZHANG Z N. Challenges and countermeasures for the drilling and completion of deepwater wells in the South China Sea[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2015, 43(04): 1-7.]
- [20] ALBERTY M W, HAFLE M E, MINGE J C. Mechanisms of shallow waterflows and drilling practices for intervention[C]. Offshore Technology Conference, Houston. Texas, May 5-8, 1997, OTC 8301.
- [21] 叶志, 樊洪海, 张国斌, 等. 深水钻井地质灾害浅层水流问题研究[J]. 石油钻探技术, 2010, 38(06): 48-52. [YE Z, FAN H H, ZHANG G B, et al. Investigation of shallow water flow in deepwater drilling[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2010, 38(06): 48-52.]
- [22] 孙运宝, 赵铁虎, 秦柯. 南海北部白云凹陷沉积压实作用对浅水流超压演化影响数值模拟[J]. 地球科学进展, 2014, 29(09): 1055-64. [SUN Y B, ZHAO T H, QIN K. Numerical simulation of overpressure of shallow water flow in Baiyun Sag of the Northern South China Sea[J]. Advances in Earth Science, 2014, 29(09): 1055-64]
- [23] FERTL W H, CHILINGARIAN G V. Importance of abnormal formation pressures (includes associated paper 6560)[J]. Journal of Petroleum Technology, 1977, 29(04): 347-354.
- [24] BARKER C. Aquathermal pressuring-role of temperature in development of abnormal-pressure zones[J]. AAPG Bulletin, 1972, 56(10): 2068-2071.
- [25] GONG Z, REN S, ZHANG L, et al. Shallow gas and shallow water flow induced by natural gas hydrate dissociation in deep water sediments[C]. Offshore Technology Conference, Houston, Texas, USA, May 1-4, 2017, OTC-27624-MS.
- [26] XU W, GERMANOVICH L N. Excess pore pressure resulting from methane hydrate dissociation in marine sediments: A theoretical approach[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2006, 111(B1).
- [27] PRASAD M. Acoustic measurements in unconsolidated sands at low effective pressure and overpressure detection[J]. Geophysics, 2002, 67(2): 405-412.
- [28] SCHUBERTH P C, WALKER M W. Shallow water flow planning and operations: Titan# 1 exploration well, deepwater Gulf of Mexico[C]. SPE/IADC drilling conference, Amsterdam, Holland, Mar 9-11, 1999, SPE/IADC 52781.
- [29] WINKER C D, HANNAFORD R J. Geology of shallow-water flow at Ursa: 2. drilling principles and practice[C]. Offshore Technology Conference, Houston, Texas, USA, 30 April-3 May, 2007, OTC 18823.
- [30] EATON L F, ACTIS S C, WILLIAMSON R N, et al. Deepwater batchset operations through the Magnolia shallow water flow sand[C]. SPE/IADC Drilling Conference, Amsterdam, The Netherlands, Feb 23-25, 2005, SPE/IADC 92289.
- [31] 唐海雄, 韦红术, 易远元, 等. 应用速度场技术预测深水钻井中的浅层地质灾害[J]. 天然气工业, 2014, 34(05): 95-9. [TANG H X, WEI H S, YI Y Y, et al. Application of seismic wave velocity field to predict the geological disasters in shallow strata during deep sea drilling[J]. Natural Gas Industry, 2014, 34(05): 95-9.]
- [32] MORENO C, CASTAGNA J, HUFFMAN A, et al. The Vp/Vs inversion procedure: A methodology for shallow water flow (SWF) prediction from seismic analysis of multicomponent data[C]. Offshore Technology Conference, Houston, Texas, USA, May 5-8 2003, OTC 15248.
- [33] MCCONNELL D R. Optimizing deepwater well locations to reduce the risk of shallow-water-flow using high-resolution 2D and 3D seismic data[C]. Offshore Technology Conference, Houston, Texas, May 1-4 2000, OTC 11973.
- [34] SHARP A, SAMUEL A. An example study using conventional 3D seismic data to delineate shallow gas drilling hazards from the West Delta Deep Marine Concession, offshore Nile Delta, Egypt[J]. Petroleum Geoscience, 2004, 10(2): 121-129.
- [35] BYRD T M, SCHNEIDER J M, REYNOLDS D J, et al. Identification of "flowing water sand" drilling hazards in the deepwater Gulf of Mexico[C]. Offshore Technology Conference, Houston, Texas, May 6-9 1996, OTC 7971.
- [36] 王海平, 李春雷, 焦叙明, 等. 海底及浅层地质灾害的高分辨率地震预测技术[J]. 工程地球物理学报, 2016, 13(06): 694-700. [WANG H P, LI C L, JIAO X M, et al. High-resolution seismic prediction technology of seafloor and shallow geohazards[J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2016, 13(06): 694-700.]
- [37] 周波, 杨进, 张百灵, 等. 海洋深水浅层地质灾害预测与控制技术[J]. 海洋地质前沿, 2012, 28(01): 51-4. [ZHOU B, YANG J, ZHANG B L, et al. Prediction and control technology of shallow geological hazards in deepwater area[J]. Marine Geology Frontiers, 2012, 28(01): 51-4.]
- [38] MALLICK S, DUTTA N C. Shallow water flow prediction using prestack waveform inversion of conventional 3D seismic data and rock modeling[J]. The Leading Edge, 2002, 21(7): 675-680.
- [39] LU S, MCMECHAN G A, LIAW A. Identification of SWF sands by elastic inversion of conventional 3D seismic data[C]. Offshore Technology Conference, Houston, Texas, USA, May 5-8 2003, OTC 15247.
- [40] DUTTA N C. Deepwater geohazard prediction using prestack inversion of large offset P-wave data and rock model[J]. The Leading Edge, 2002, 21(2): 193-198.
- [41] 吴时国, 孙运宝, 王秀娟, 等. 南海北部深水盆地浅水流的地球物理特性及识别[J]. 地球物理学报, 2010, 53(07): 1681-90. [WU

- S G, SUN Y B, WANG X J, et al. Geophysical signature and detection of shallow water flow in the deepwater northern South China Sea[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2010, 53(07): 1681–90.]
- [42] DIX C H. Seismic velocities from surface measurements[J]. Geophysics, 1955, 20(1): 68–86.
- [43] AKI K, LEE W H K. Determination of three-dimensional velocity anomalies under a seismic array using first P arrival times from local earthquakes: 1. A homogeneous initial model[J]. Journal of Geophysical research, 1976, 81(23): 4381–4399.
- [44] 叶银灿. 海洋灾害地质学发展的历史回顾及前景展望[J]. 海洋学研究, 2011, 29(04): 1–7. [YE Y C. Review of the development of marine hazard geology and its prospects[J]. Journal of Marine Sciences, 2011, 29(04): 1–7.]
- [45] NADIM F, KVALSTAD T J. Risk assessment and management for offshore geohazards[J]. ISGSR2007 First International Symposium on Geotechnical Safety & Risk, Shanghai, China, Oct 18–19, 2007.
- [46] 任韶然, 宫智武, 张亮, 等. 南海北部陆坡浅水流评估及深水钻井防治措施[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2017, 41(04): 99–106.[REN S R, GONG Z W, ZHANG L, et al. Shallow water flow hazard assessment in the northern slope of the South China Sea and control measures during deepwater drilling[J]. Journal of China University of Petroleum, 2017, 41(04): 99–106.]
- [47] REN S, LIU Y, GONG Z, et al. Numerical simulation of water and sand blowouts when penetrating through shallow water flow formations in deep water drilling[J]. Journal of Ocean University of China, 2018, 17(1): 17–24.
- [48] 孙金, 吴时国, 邓金根, 等. 深水钻井浅水流地层井眼坍塌影响因素分析[J]. 石油钻探技术, 2019, 47(02): 34–41. [SUN J, WU S G, DENG J G, et al. Analysis of the contributing factors to wellbore collapse in shallow water flow formations for deepwater drilling[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2019, 47(02): 34–41.]
- [49] 季雯宇, 樊建春, 武胜男, 等. 深水钻井浅水流环空冲蚀数值模拟研究[J]. 石油管材与仪器, 2019, 5(05): 34–8. [JI W Y, FAN J C, WU S N, et al. Numerical simulation on casing annular erosion wear in deepwater drilling[J]. Petroleum Tubular Goods & Instruments, 2019, 5(05): 34–8.]
- [50] GAO Y, SUN B, XU B, et al. A wellbore/formation-coupled heat-transfer model in deepwater drilling and its application in the prediction of hydrate-reservoir dissociation[J]. SPE journal, 2017, 22(03): 756–766.
- [51] WANG Z, SUN B. Annular multiphase flow behavior during deep water drilling and the effect of hydrate phase transition[J]. Petroleum Science, 2009, 6(1): 57–63.
- [52] SHI C, LIN B, JIN Y, et al. Experimental investigation on generation and development of shallow water flow in overpressured sand formation[C]. Offshore Technology Conference, Houston, Texas, USA, May 6–9, 2019, OTC–29416–MS.
- [53] SHENTU J, LIN B, JIN Y, et al. Mechanism and risk assessment of shallow water flow based on laboratory and numerical studies[C]. Offshore Technology Conference Asia, Kuala Lumpur, Nov 2–6, 2020, OTC–30380–MS.
- [54] 张学工. 关于统计学习理论与支持向量机[J]. 自动化学报, 2000(01): 36–46. [ZHANG X G, Introduction to statistical learning theory and support vector machines[J]. ACTA AUTOMATICA SINICA, 2000(01): 36–46.]
- [55] 丁世飞, 齐丙娟, 谭红艳. 支持向量机理论与算法研究综述[J]. 电子科技大学学报, 2011, 40(01): 2–10. [DING S F, QI B J, TAN H Y. An overview on theory and algorithm of support vector machines[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2011, 40(01): 2–10.]
- [56] 吴时国, 赵汗青, 伍向阳, 等. 深水钻井安全的地质风险评价技术研究[J]. 海洋科学, 2007(04): 77–80. [WU S G, ZHAO H Q, WU X Y, et al. The research of geohazards estimation technique on deep-water wells[J]. Marine Sciences, 2007(04): 77–80.]
- [57] 李迅科, 周建良, 李嗣贵, 等. 深水表层钻井动态压井装置的研制与应用试验[J]. 中国海上油气, 2013, 25(06): 70–4+81. [LI X K, ZHOU J L, LI S G, et al, Development and application test of the dynamic killing unit for deep water top-hole drilling[J]. China Offshore Oil and Gas, 2013, 25(06): 70–4+81.]
- [58] CHOE J, JUVKAM-WOLD H C. Unconventional method of conductor installation to solve shallow water flow problems[C]. SPE Annual Technical Conference and Exhibition, San Antonio, Texas, Oct 5–8, 1997, SPE 38625.
- [59] EOFF L, SWEATMAN R, FAUL R. New chemical systems and placement methods to stabilize and seal deepwater shallow-water flow zones[C]. Offshore Technology Conference, Texas, May 1–4, 2020, OTC 11976.
- [60] TURNER K M, MORALES L J. Riserless drilling with CaCl<sub>2</sub> mud prevents shallow water flows[C]. IADC/SPE Drilling Conference, New Orleans, Louisiana, Feb 23–25, 2000, IADC/SPE 59172.
- [61] WHITFILL D L, HEATHMAN J, FAUL R R, et al. Fluids for drilling and cementing shallow water flows[C]. SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Dallas, Texas, Oct 1–4 2000, SPE 62957.
- [62] BOGAERTS M, DE BRUIJN G G, KHALILOVA P R, et al. Identifying and mitigating the risks of shallow flow in deepwater cementing operations[C]. SPE Deepwater Drilling and Completions Conference, Galveston, Texas, USA, Jun 20–21, 2012, SPE 155733.
- [63] ODDEN D A, LENDE G, REHMAN K, et al. Use of foam cement to prevent shallow water flow on three wells in Norwegian waters[C]. International Petroleum Technology Conference, Dhahran, Saudi Arabia, Jan 13–15, 2020, IPTC–19747–MS.
- [64] FAUL R, REDDY B R, GRIFFITH J, et al. Next-generation cementing systems to control shallow water flow[C]. Offshore Technology Conference, Houston, Texas, May 1–4, 2000, OTC 11977.

- [65] 林伯韬, 郭建成. 人工智能在石油工业中的应用现状探讨[J]. 石油科学通报, 2019, 4(04): 403-13. [LIN B T, GUO J C, Discussion on current application of artificial intelligence in petroleum industry[J]. Petroleum Science Bulletin, 2019, 4(04): 403-13.]
- [66] 王雨墨, 李彦博, 李晓平, 等. 人工神经网络预测管道冲蚀速率研究进展[J]. 石油科学通报. 2020, 5(01): 114-21. [WANG Y M, LI Y B, LI X P, et al. Recent progress on ANN-based pipeline erosion predictions[J]. Petroleum Science Bulletin, 2020, 5(01): 114-21.]
- [67] 徐朝晖, 刘钰铭, 周新茂, 等. 基于卷积神经网络算法的自动地层对比实验[J]. 石油科学通报, 2019, 4(01):1-10. [XU Z H, LIU Y M, ZHOU X M, et al. An experiment in automatic stratigraphic correlation using convolutional neural networks [J]. Petroleum Science Bulletin, 2019, 4(01):1-10.]

(编辑 马桂霞)