

doi: 10.11731/j.issn.1673-493x.2020.08.001

# 基于 DEMATEL/ISM 的深水井喷风险影响因素研究\*

朱敬宇, 陈国明, 曹恩泽, 戴子良

(中国石油大学(华东)海洋油气装备与安全技术研究中心, 山东 青岛 266580)

**摘要:** 为提高深水井喷事故风险管理水平, 提出研究深水井喷风险影响因素的分析方法。从技术、人员、环境和管理 4 个方面, 识别深水井喷事故风险致因因素, 建立深水井喷事故风险评价指标体系; 运用矩阵决策实验室分析法( DEMATEL), 研究风险因素之间的相互影响关系, 计算不同风险因素的中心度和原因度, 确定关键风险因素; 进一步基于解释结构模型( ISM) 划分不同影响因素的层次结构, 分析风险因素之间的综合影响关系, 建立深水井喷事故风险影响因素模型。结果表明: 层级 1 为近邻致因, 可直接导致井喷事故的发生; 层级 2~7 为过渡致因, 在风险传递过程中起到桥梁作用, 对井喷事故的直接影响较小; 而层级 8 则为本质致因, 重视本质致因的改善有利于从根源上降低井喷事故的风险。研究结果可为深水井喷事故风险的预防和控制提供理论依据。

**关键词:** DEMATEL; ISM; 深水; 井喷风险; 影响因素

**中图分类号:** X937      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1673-493X(2020)-08-0005-06

## Study on influencing factors of deepwater blowout risk based on DEMATEL/ISM

ZHU Jingyu, CHEN Guoming, CAO Enze, DAI Ziliang

(Centre for Offshore Engineering and Safety Technology, China University of Petroleum, Qingdao Shandong 266580, China)

**Abstract:** To improve the management level of deepwater blowout accident risk, an analysis method for the influencing factors of deepwater blowout risk was proposed and studied. The risk causation factors of deepwater blowout accident were identified from four aspects of technology, human, environment and management, and an index system for risk evaluation of deepwater blowout accident was established. The Decision-making Trial and Evaluation Laboratory ( DEMATEL) method was used to study the interaction relationship among the risk factors, and the centrality and cause degree of different risk factors were calculated to determine the key risk factors. Furthermore, the hierarchical structure of different influencing factors was divided based on the Interpretive Structural Model ( ISM), then the comprehensive influence relationship among the risk factors was analyzed, and an model for the influencing factors of deepwater blowout accident risk is established. The results showed that the level 1 were the near neighbour causation, which might lead to the blowout accident directly. The level 2, 3, 4, 5, 6, 7 were the transitional causation, which played a bridge role in the risk transmission process and had little direct influence on the blowout accident. The level 8 were the essential causation, which could reduce the risk of blowout accidents fundamentally. The research can provide theoretical basis for the prevention and control of deepwater blowout accident risk.

**Key words:** DEMATEL; ISM; deepwater; blowout risk; influencing factor

## 0 引言

深水钻井作业面临钻井窗口窄、地质条件复杂、海况条件恶劣、钻井设备复杂及井控难度大等诸多挑战。2010 年发生在墨西哥湾的“深水地平线”的石油泄漏事故(下文简称“深水地平线”事故)表明,失去控制的井

喷会引发严重的事故,造成巨大的经济损失,甚至危及人的生命<sup>[1]</sup>。因此,开展深水井喷事故风险影响因素分析,明确关键致因因素,对降低深水井喷事故风险具有重要意义<sup>[2]</sup>。

目前,国内外学者针对井喷事故风险开展一系列研究,高永海等<sup>[3]</sup>通过调研井喷事故案例开展井喷风险因

收稿日期: 2020-04-26

\* 基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC0804501)

作者简介: 朱敬宇, 博士研究生, 主要研究方向为深水井喷事故风险评估及控制。

通信作者: 陈国明, 博士, 教授, 主要研究方向为海洋油气装备、油气安全工程。

素分析,确定导致深水井喷的主要风险因素;文献[4-6]基于挪威海上油气项目成果,建立预防深水油气井喷事故的安全评价指标体系,并以“深水地平线”井喷事故为例,提出深水井喷事故定量风险评估方法;Xue等<sup>[7]</sup>从系统的角度出发,建立井喷事故评价模型;杜钢等<sup>[8]</sup>在井喷失控风险因素分析的基础上,提出1种基于MLS的井喷失控危险评价方法;为有效预防深水井喷失控事故,Tamin等<sup>[9]</sup>建立井喷风险评估先行指标体系;孟祥坤等<sup>[10]</sup>提出基于风险熵和复杂网络的井喷事故演化方法,揭示井喷事故的发生机理;考虑海上钻井作业的动态性和复杂性;Sule等<sup>[11]</sup>提出1种深水井喷动态风险评估方法。

然而,上述研究对井喷风险影响因素之间的相互作用鲜有关注,尤其是对各影响因素的影响关系缺乏深入研究。深水井喷风险因素繁多、性质各异,并且风险因素之间存在相互影响,因此,探明井喷风险因素间的关联关系,明确风险因素之间的层次关系,揭示井喷事故风险因素之间的影响作用是控制井喷风险的前提和基础,本文以期采用DEMATEL/ISM方法解决上述问题。通过分析井喷事故致因风险因素的因果属性,确定不同因素对井喷事故发生的影响程度以及导致井喷事故发生的本质致因、过渡致因和直接致因,建立深水井喷事故风险影响因素模型,以期对深水井喷风险控制和安全管理提供决策依据和参考。

### 1 深水井喷事故致因分析

通过对海上井喷事故案例调研及相关文献对井喷事故风险分析<sup>[7]</sup>,将深水井喷事故风险影响因素划分为技术、人员、环境和管理4个方面。

1) 技术风险因素。一般是指平台、井控设备与工艺的可靠性偏离期望引起的风险,不仅包括防喷器和分流器失效等设备故障,还包含井身结构不合理、固井质量差等工艺风险。通过提取深水井喷事故报告中的技术风险因素,得出防喷器系统失效和阻流/压井管汇失效等10个风险因素,具体描述参见表1。

2) 人员风险因素。人员风险因素指影响钻井过程导致井喷事故发生,甚至造成严重后果的人的行为,据统计,海上作业事故中由人员失误导致的占比为75%~96%<sup>[12]</sup>。海上钻井作业程序复杂,人员因素风险已成为造成井喷事故的重要原因,例如,工作载荷过大导致员工疲劳,会降低人员的事事故情景感知能力和情景辨识速度,并增加人员的反应时间;人员的心理状况不佳会干扰作业人员对信息的感知,导致对可用信息的关注不足等<sup>[13]</sup>。导致深水井喷事故发生的人因风险因素具体见表2。

表 1 深水井喷事故技术风险因素

Table 1 Technology risk factors of deepwater blowout accident

风险因素	描述
防喷器系统	包含防喷器控制系统和设备,当井内出现溢流时,能在短时间内实现关井作业
阻流/压井管汇	用于压井放喷期间控制井口回压和有节制地排放溢流
分流系统	当发生浅层气井涌或井喷时,将地层流体(浅层气)放喷到指定位置予以处理
钻柱内防喷工具	安装在钻柱上防止井涌逆流的安全阀
隔水管/井口系统	为钻井泥浆提供1个完整的循环回路,引导钻具,隔绝海水,在必要时进行紧急解脱作业
监测系统	通过监测压力、流量、液面高度等参数来实现井涌溢流的实时监测
套管结构完整性	防止地层流体在油气开发过程中无控制地向外层空间流动的安全屏障
固井质量	固井水泥环胶结质量和层间封隔效果
井身结构设计	包括套管层次结构和下入深度的确定,以及井眼尺寸与套管尺寸的配合设计
钻井液性能	钻井过程中能够满足钻井工作需要的各种循环流体总称

表 2 深水井喷事故人员风险因素

Table 2 Human risk factors of deepwater blowout accident

风险因素	描述
受教育水平	受教育水平决定人员对客观事物的认知和思维能力,会直接影响人的安全意识、安全行为和安全习惯等
工作载荷	工作载荷的过大会导致员工疲劳,降低操作人员的警惕性和情景感知能力,从而降低人员的情景辨识速度,增加人员的反应时间
员工技能水平	决定作业人员对不同仪表、报警和异常状态的认知水平和反应能力
人员心理状况	人员心理状况与人员的记忆力和注意力有直接关系,同时会影响其对信息的接受程度和敏感性,干扰作业人员对信息的感知
人员生理状况	人的生理状况不佳会直接影响大脑的意识水平,导致人员不能及时观察井涌异常、错误判断压力和流量变化等不安全行为

3) 环境风险因素。深水钻井环境的特殊性和复杂性,使得深水井控作业面临诸多挑战。深水井控面临的环境因素主要包括自然环境和地质条件2个方面<sup>[7]</sup>。自然环境风险因素又分为静态风险和动态风险因素,静

态风险因素包括作业水深,动态风险因素包括台风和海况;地质方面的风险因素主要是由于地质条件的复杂性和不确定性引起的,具体包括钻井窗口、地层压力、温度、浅层气、浅层流、海床条件和地层岩性,详细描述参见表3。

表3 深水井喷事故环境风险因素  
Table 3 Environment risk factors of deepwater blowout accident

风险因素	描述
钻井作业窗口	保证钻井过程中不造成井喷、井漏等钻井事故的钻井压力(密度)范围
地层压力	地层压力包括地层孔隙压力、坍塌压力、破裂压力和上覆岩层压力,井喷的根本原因是地层与井筒的压力失去平衡
地层温度	钻井液的性能对地层温度比较敏感,地层温度超过200℃时,高密度钻井液聚合物会发生降解,钻井液中会出现凝胶,破坏钻井液的性能
地层岩性	地层岩性参数包括地层孔隙度、体积密度、油气饱和度和地层水含盐量等,随地层压力的不同而发生变化
浅层气	埋藏层位浅,使得报警时间短,早期的井侵很难被发现,可能在未报警时直接到达地面
浅层流	钻井时会造成井眼扩大、井壁坍塌,引起井控问题
海况条件	在恶劣海况条件下,钻井设备的操作严重受限,平台和隔水管的损伤显著增加
海床条件	海床条件有较多不稳定因素,其中主要包括斜坡垮塌和地质松软等作业不利因素
台风	台风对深水钻井过程有较大威胁,如避台撤离不及时容易导致隔水管断裂、井喷失控事故
水深	随着水深作业的增加,气体的侵入和膨胀不易被发现,导致井涌检测和控制的难度增加

4) 管理风险因素。管理风险因素是石化行业普遍存在的风险因素,井喷事故风险不仅与管理者自身的知

识水平和能力有关,同时还与管理组织结构、应急响应能力以及信息沟通等因素有直接的关系<sup>[14]</sup>。“深水地平线”事故调查结果表明,深水钻井平台组织管理存在严重问题,钻井承包商为缩短工期,减少固井水泥的用量,甚至放弃固井质量测试环节;BP管理层的决策失误也是造成此次严重事故后果的重要因素。基于上述分析,将深水井喷管理风险因素进行整理,具体参见表4。

表4 深水井喷事故管理风险因素  
Table 4 Management risk factors of deepwater blowout accident

风险因素	描述
组织结构	健全的组织结构、明确的人员职责以及完善的规章制度是避免溢流发生的基础
安全教育培训	安全制度、安全知识、安全技能教育和安全态度培训,使得作业人员能够遵守安全操作流程,准确识别井涌、溢流的迹象以及各种压井方法
应急响应水平	应急响应是针对井喷失控情境下采取的一系列措施,包括启动关、压井程序封井,平台的紧急脱离,防止平台发生火灾爆炸,对作业人员进行紧急撤离等响应
变更管理水平	标准的变更管理流程和有效的变更管理手段是保证井控系统有效运行的重要支撑
信息沟通	良好的通讯能够保证作业人员的信息沟通,及时接收平台和作业人员之间的信息,保证操作人员了解钻井作业进度和状态信息,对现场作业情况迅速做出反应

基于对深水井喷事故风险因素分析,确定深水钻井过程导致井喷事故发生的30个风险因素,构建深水井喷事故风险评价指标体系,如图1所示。

## 2 DEMATEL/ISM 风险分析方法

### 2.1 DEMATEL/ISM 方法

决策试验与评价实验室法(Decision Making Trial and Evaluation Laboratory, DEMATEL)是以矩阵和图论为

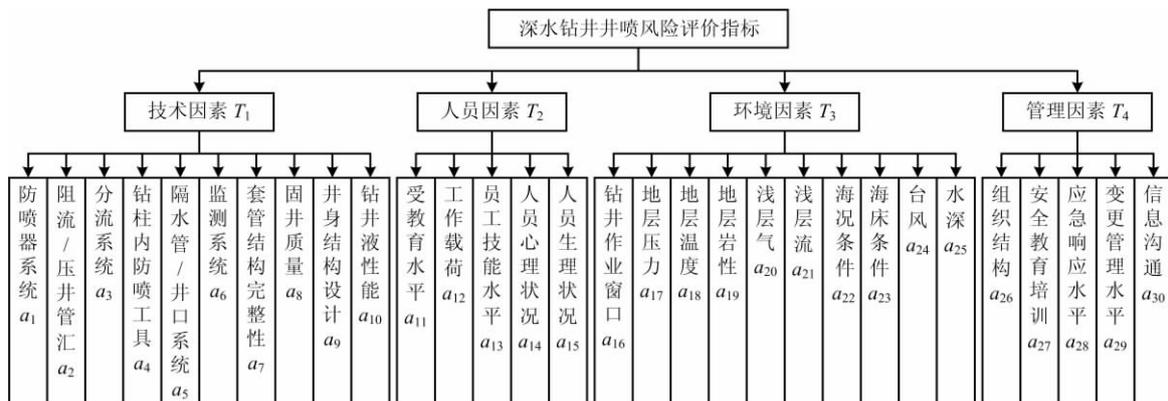


图1 深水井喷事故风险评价指标体系

Fig. 1 Index system for risk evaluation of deepwater blowout accident

工具的系统因素分析方法,可用于量化风险因素间的相互依赖关系<sup>[15]</sup>。解释结构模型(Interpretive Structure Model,ISM)是由美国的 John Warfield 于 1973 年提出的<sup>[16]</sup>,其可在 DEMATEL 方法的基础上,考虑自身因素的影响确定风险因素之间的层级结构,易于分析深水井喷风险因素之间的关联和层级关系。

### 2.2 DEMATEL/ISM 方法步骤

基于 DEMATEL/ISM 法分析深水井喷风险因素相互影响关系,可分为以下步骤:

1) 通过风险辨识确定深水井喷事故致因因素  $a_1, a_2, \dots, a_n, a_i \in A (i = 1, 2, \dots, n)$ , 其中  $n$  为井喷致因数日,  $A$  为井喷事故致因因素集合。

2) 建立初始直接影响关系矩阵  $D$ , 根据专家经验获得因素间的直接影响矩阵  $D^k (D^k = [d_{ij}^k]_{n \times n})$ , 采用取平均法集合多位专家的评价结果, 消除专家主观差异, 获得初始直接影响关系矩阵如式(1)所示:

$$D = (d_{ij})_{n \times n} = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m d_{ij}^k (k = 1, 2, \dots, m) \quad (1)$$

式中:  $d_{ij}^k$  为第  $k$  位专家给出的因素  $a_i$  对  $a_j$  的影响程度;  $m$  为专家数量。

3) 规范化直接影响矩阵, 通过规范化处理, 得到规范化直接影响矩阵  $C$  如式(2)所示:

$$C = (c_{ij})_{n \times n} = \frac{1}{\max_{1 \leq i \leq n} \sum_{j=1}^n d_{ij}} D \quad (2)$$

4) 计算综合影响矩阵  $T$ , 为进一步考虑致因因素之间的间接影响关系, 以及 1 个因素变化之后引起的波及效应, 可通过直接影响与间接影响之间的累加, 最终确定综合影响矩阵  $T$ , 如式(3)所示:

$$T = C + C^2 + \dots + C^n = \sum_{i=1}^n C^i \quad (3)$$

5) 评估因素影响度和被影响度如式(4)~(5)所示:

$$r_i = \sum_{j=1}^n t_{ij} (i = 1, 2, \dots, n) \quad (4)$$

$$c_i = \sum_{j=1}^n t_{ji} (i = 1, 2, \dots, n) \quad (5)$$

式中:  $r_i$  为因素影响度, 表示第  $i$  个因素对其他因素的直接和间接影响综合程度;  $c_i$  为因素被影响度, 表示第  $j$  个因素受其他因素的直接和间接影响综合程度。

6) 计算中心度和原因度, 如式(6)~(7)所示:

$$M_i = r_i + c_i \quad (6)$$

$$N_i = r_i - c_i \quad (7)$$

式中:  $M_i$  为中心度, 表示风险因素  $i$  受其他因素的影响, 即表示因素  $i$  在系统中的重要性程度;  $N_i$  为原因度, 表示因素  $i$  对其他因素的影响, 即风险因素之间的

因果逻辑关系重要性程度。

7) 计算整体影响矩阵  $H (H = [h_{ij}])$ , 可在综合影响矩阵的基础上考虑自身因素影响得到, 如式(8)所示:

$$H = I + T \quad (8)$$

式中:  $I$  为单位矩阵。

8) 计算标准化可达矩阵, 通过给定阈值  $\lambda$ , 对整体影响矩阵的元素进行处理, 得到可达矩阵  $K (K = [k_{ij}])$ , 如式(9)所示:

$$k_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{if } h_{ij} \geq \lambda (i, j = 1, 2, \dots, n) \\ 0, & \text{if } h_{ij} < \lambda (i, j = 1, 2, \dots, n) \end{cases} \quad (9)$$

9) 确定可达集合  $R_i$  和前因集合  $S_i$ , 如式(10)所示:

$$\begin{cases} R_i = \{a_j | a_j \in A, k_{ij} = 1\} (i, j = 1, 2, \dots, n) \\ S_i = \{a_j | a_j \in A, k_{ji} = 1\} (i, j = 1, 2, \dots, n) \end{cases} \quad (10)$$

10) 确定递阶层次结构模型中每一层的风险因素  $R_i$ , 如式(11)所示:

$$R_i = R_i \cap S_i (i = 1, 2, \dots, n) \quad (11)$$

如满足式(11), 说明  $R_i$  中的要素均可能在  $S_i$  中找到前因, 则  $a_i$  为最高层级元素, 在矩阵  $K$  中划去第  $i$  行和第  $i$  列, 重复此步骤, 直至确定所有的层级, 根据确定的不同层级元素构建深水井喷事故风险影响因素模型。

### 3 案例分析

为验证 DEMATEL/ISM 方法的有效性, 以某深水钻井工程为例, 开展深水井喷风险影响因素研究, 揭示风险因素之间的层级关系。该深水井钻井工程部分参数见表 5。

表 5 某深水钻井工程部分参数

Table 5 Partial parameters for a certain deepwater drilling engineering

工程参数	工作条件
井型	定向井
建井周期	60 d
设计井深	4 005 m
水深	1 300 m
海况	平均有效波高 2.9 m
浅层地质灾害	陡坡、断层和浅层气
平台类型	第六代半潜式平台
水下防喷器的工作压力	103.4 MPa

#### 3.1 井喷风险因素因果影响分析

首先应用问卷调查法对该井的钻井副总工程师、井控工程师、钻井监督和安全技术人员进行访问, 按照无、非常弱、较弱、中等、较强、非常强和极强 7 个等级表示因素之间的影响程度, 得到 4 个初始直接影响矩阵, 运

用平均法集合专家意见,得到平均后的直接影响矩阵,根据 DEMATEL/ISM 方法的步骤 3),规范直接影响矩阵,然后进行步骤 4),计算综合影响矩阵,再根据步骤 5)和 6),确定风险因素的中心度和原因度,计算结果见表 6。

表 6 井喷风险因素中心度与原因度  
Table 6 Centrality and cause degree of blowout risk factors

风险因素	中心度	原因度	中心度排序	属性
$a_1$	2.478	-1.160	2	结果
$a_2$	2.119	-0.845	7	结果
$a_3$	2.141	-0.927	6	结果
$a_4$	1.892	-0.658	11	结果
$a_5$	2.382	-0.865	4	结果
$a_6$	2.793	-0.315	1	结果
$a_7$	2.009	-0.428	9	结果
$a_8$	2.000	-0.511	10	结果
$a_9$	1.145	0.213	24	原因
$a_{10}$	1.452	0.086	19	原因
$a_{11}$	1.343	0.853	20	原因
$a_{12}$	1.869	-0.535	12	结果
$a_{13}$	1.519	0.239	15	原因
$a_{14}$	2.024	-0.532	8	结果
$a_{15}$	1.320	-0.058	22	结果
$a_{16}$	1.299	0.414	23	原因
$a_{17}$	1.501	0.753	17	原因
$a_{18}$	1.001	0.583	25	原因
$a_{19}$	0.972	0.601	27	原因
$a_{20}$	1.453	1.039	18	原因
$a_{21}$	1.323	1.254	21	原因
$a_{22}$	0.950	0.556	28	原因
$a_{23}$	0.618	0.348	30	原因
$a_{24}$	0.979	0.824	26	原因
$a_{25}$	0.842	0.791	29	原因
$a_{26}$	1.702	0.252	13	原因
$a_{27}$	1.635	0.125	14	原因
$a_{28}$	2.290	-1.054	5	结果
$a_{29}$	1.505	-0.416	16	结果
$a_{30}$	2.451	-0.626	3	结果

根据表 6 可知,浅层气( $a_{20}$ )、浅层流( $a_{21}$ )、台风( $a_{24}$ )和水深( $a_{25}$ )此 4 个因素的原因度较大,在系统中易影响到其他风险因素,同时也是钻井过程中需要重点预防的风险因素;而中心度较大的指标为:监测系统

( $a_6$ )、防喷器系统( $a_1$ )、信息沟通( $a_{30}$ )和隔水管-井口系统( $a_5$ ),说明上述指标在井喷事故评价体系中的作用和功能较高。

### 3.2 井喷风险影响因素模型

以可达矩阵为基础,选取阈值  $\lambda$  为 0.045,应用 ISM 法划分不同层级风险因素,根据计算可将井喷风险因素划分为 8 个层级,依次为:  $K_1 = \{a_{28}, a_3, a_2, a_1\}$ ;  $K_2 = \{a_{14}, a_4\}$ ;  $K_3 = \{a_{29}, a_6, a_5\}$ ;  $K_4 = \{a_{12}, a_{25}, a_{22}, a_8, a_7\}$ ;  $K_5 = \{a_{30}, a_{23}, a_{10}, a_9\}$ ;  $K_6 = \{a_{24}, a_{21}, a_{16}, a_{15}, a_{13}\}$ ;  $K_7 = \{a_{27}, a_{19}, a_{17}, a_{11}\}$ ;  $K_8 = \{a_{26}, a_{20}, a_{18}\}$ 。基于以上分析结果,进一步考虑风险因素之间交互耦合影响,以防喷器系统( $a_1$ )的失效会影响钻柱内防喷工具  $a_4$  的正常作业为例,用 1 条由  $a_1$  出发指向  $a_4$  的有向弧连接,表示因素  $a_4$  受到因素  $a_1$  的影响,考虑所有因素之间的相互作用,建立深水井喷事故风险影响因素模型,如图 2 所示。

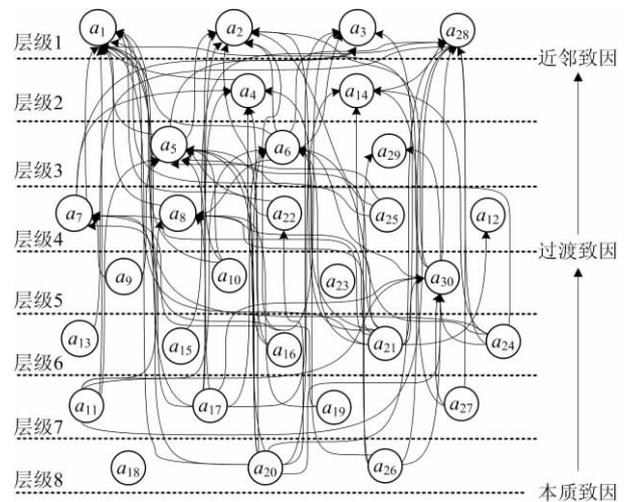


图 2 深水井喷事故风险影响因素模型  
Fig. 2 Model for influencing factors of deepwater blowout accident risk

由图 2 可知,深水井喷事故风险影响因素模型可分为 8 个层级,层级 1 为近邻致因,是导致井喷事故发生的最直接因素,并有多起事故表明:井喷事故发生的直接原因为防喷器系统( $a_1$ )和阻流/压井管汇( $a_2$ ),因此采取有效措施直接控制近邻致因因素,对于预防井喷事故的发生可起到快速显著的效果;层级 2~7 为过渡致因,起到承上启下的作用,因素的连接边越多说明该因素的影响关系越显著,同时在模型中起到的作用越关键,过渡致因中隔水管-井口系统( $a_5$ )、监测系统( $a_6$ )、固井质量( $a_8$ )和信息沟通( $a_{30}$ )在模型中的关系较复杂,与其他因素发生非线性交互耦合作用的可能性较大;而层级 8 为本质致因,其中地层温度( $a_{18}$ )和浅层气( $a_{20}$ )属于地质属性,而组织结构( $a_{26}$ )则反映钻井公司

安全管理水平,控制以上因素有利于从根源上降低井喷事故的风险。

## 4 结论

1) 开展深水井喷事故致因风险分析,从技术、人员、环境和管理 4 个方面分析井喷事故风险,确定防喷器系统( $a_1$ )、阻流/压井管汇( $a_2$ )、分流系统( $a_3$ )等 30 个深水井喷风险因素,并建立深水井喷事故风险评价指标体系。

2) 基于井喷风险因素之间的相互影响关系,分别计算 30 个井喷风险因素的原因度和中心度,根据原因度排序确定对其他风险因素影响较大,需要重点预防的 4 个风险因素,同时根据中心度大小确定深水井喷风险评价体系中重要度较高的 4 个风险因素。

3) 建立基于 DEMATEL/ISM 的深水井喷事故风险影响因素模型,该模型将所有井喷风险因素划分为本质致因、过渡致因和近邻致因 3 类;并确定井喷风险因素之间的层级结构,直观显示风险因素之间的影响作用关系,可为针对性地降低井喷事故风险水平提供依据。

## 参考文献

- [1] 陈国明,朱高庚,朱渊.深水油气开采安全风险评估与管控研究进展[J].中国石油大学学报(自然科学版),2019,43(7):136-145.  
CHEN Guoming,ZHU Gaogeng,ZHU Yuan. Advances in safety assessment and risk management for deepwater oil and gas exploitation [J]. Journal of China University of Petroleum( Edition of Natural Science),2019,43(7):136-145.
- [2] 陈国明.海洋油气工程安全风险评价研究[M].东营:中国石油大学出版社,2018.
- [3] 高永海,孙宝江,曹式敬,等.应用事故树法对深水井控进行风险评估[J].石油钻采工艺,2008,30(2):23-27.  
GAO Yonghai,SUN Baojiang,CAO Shijing, et al. Risk assessment on well control in deepwater drilling based on fault tree analysis [J]. Oil Drilling & Production Technology,2008,30(2):23-27.
- [4] SKOGDALEN J E,UTNE I B,VINNEM J E. Developing safety indicators for preventing offshore oil and gas deepwater drilling blowouts [J]. Safety Science,2011,49(8-9):1187-1199.
- [5] 魏超南,陈国明.“深水地平线”钻井平台井喷事故剖析与对策探讨[J].钻采工艺,2012,35(5):18-21.  
WEI Chaonan,CHEN Guoming. Analysis and precaution of the blow-out on deep horizon rig [J]. Drilling & Production Technology,2012,35(5):18-21.
- [6] SKOGDALEN J E,VINNEM J E. Quantitative risk analysis of oil and gas drilling, using Deepwater Horizon as case study [J]. Reliability Engineering & System Safety,2012,100:58-66.
- [7] XUE L,FAN J,RAUSAND M, et al. A safety barrier-based accident model for offshore drilling blowouts [J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries,2013,26(1):164-171.
- [8] 杜钢,于洋飞,熊朝东,等.钻井井喷失控因素分析及预防对策[J].中国安全生产科学技术,2014,10(2):120-125.  
DU Gang,YU Yangfei,XIONG Chaodong, et al. Analysis on factors and preventive action for drilling uncontrollable blowout [J]. Journal of Safety Science and Technology,2014,10(2):120-125.
- [9] TAMIM N,LABOUREUR D M,MENTZER R A, et al. A framework for developing leading indicators for offshore drillwell blowout incidents [J]. Process Safety and Environmental Protection,2017,106:256-262.
- [10] 孟祥坤,陈国明,郑纯亮,等.基于风险熵和复杂网络的深水钻井井喷事故风险演化评估[J].化工学报,2019,70(1):388-397.  
MENG Xiangkun,CHEN Guoming,ZHENG Chunliang, et al. Risk evaluation model of deepwater drilling blowout accident based on risk entropy and complex network [J]. CIESC Journal,2019,70(1):388-397.
- [11] SULE I,IMTIAZ S,KHAN F, et al. Risk analysis of well blowout scenarios during managed pressure drilling operation [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering,2019:106296.
- [12] PENNIE D,BROOK C N,GIBSON W. Human factors guidance for maintenance [C]. //Human factors in Ship Design, Safety and Operation Conference, The Royal Institution of Naval Architects. London: UK,2007.
- [13] MEARNS K,HOPE L. Health and well-being in the offshore environment: The management of personal health [M]. Sudbury: Health and Safety Executive,2005.
- [14] BARTLIT J F H,SANKAR S N,GRIMSLEY S C. Macondo-the gulf oil disaster-chief counsels report [M]. Washington, D. C: National Commission on the BP Deepwater Horizon Oil Spill and Offshore Drilling,2011.
- [15] FONTELA E,GABUS A. The DEMATEL Observer, DEMATEL 1976 Report [R]. Switzerland: Geneva, Battelle Geneva Research Center,1976.
- [16] WARFIELD J N. Developing interconnection matrices in structural modeling [J]. IEEE Transactions on Systems Man & Cybernetics, 1974,SMC-4(1):81-87.

(责任编辑:袁文静)