# 海底管道出露悬空环境风险的定量评价研究

李佳峻[1,3], 郭伟其[2,3], 张　杰[2,3], 陈新玺[2,3]

(1. 上海海洋大学 海洋科学学院, 上海 201306; 2. 国家海洋局东海海洋环境调查勘察中心, 上海 200137; 3. 上海东海海洋工程勘察设计研究院, 上海 200137)

**摘要**: 海底管道是海洋油气输送的主要方式, 其运行状况直接关系到海上油气田的安全和海洋生态环境的质量。本文先以海底管道出露悬空作为故障树的顶事件, 分析出海洋环境中各项基本事件, 构建针对海洋环境的海底管道故障树模型; 再以灰色模糊识别为理论基础, 量化对海底管道安全有影响的海洋环境因素, 并以层次分析法对每个风险因素进行分级赋权, 确定评价指标范围和权重, 进而构建海洋环境条件的海底管道风险评价体系。利用该体系对平湖油气田海底管道 4 个区段进行环境风险评价, 避免了将整段管道一同评价导致的信息均等化, 评价结果不能真实反映风险等级高的区段的情况; 评价结果与管道 2014~2016 年现场检测数据对比, 两者均显示 P2 分区中海底管道的风险等级较高, 说明了该模型具有一定的合理性和实用性。

**关键词**: 海底管道; 环境风险评价; 灰色模糊综合评价模型; 海洋因素

**中图分类号**: TE832　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-3096(2017)10-0010-09

DOI: 10.11759/hykx20170417001

海底管道作为海上油气平台向陆地终端输送的重要纽带, 是目前最安全、最经济和最可靠的海上油气运输方式。随着海上油气勘探技术的提升, 海底管道所达到海域越来越深, 铺设距离越来越长, 数量越来越多, 密度越来越大, 海底管道的管理难度也随之增加。为保障海底管道的正常运行, 需建立一套完善的海底管道风险评估体系, 为管道的维护和管理提供科学合理的依据, 避免造成重大的经济损失和对海洋生态环境的破坏。

自 20 世纪 70 年代开始, 世界海上油气开发技术先进的国家对管道进行风险评估研究。20 世纪 90 年代出版的《管道风险管理手册》(Pipeline Risk Management Manual)[1]总结了美国前 20 年对管道风险评估研究的重要成果, 具有里程碑意义。最近几年, 国内相关研究工作者建立了多种适用于海底管道风险综合评价体系和方法: 董丽丽[2]基于灰色模式识别理论建立了路由定量风险评估指标体系, 经量化风险后得到评估体系的标准模式并以此开发海底管道路由定量风险评估软件; 谢云杰[3]在风险辨别和故障树分析的基础上, 对海底管道所在的海底生态环境和实际情况进行了考察, 建立了适用于海底管道系统风险分析管理的评价体系, 对海底管道进行综合评价; 丁鹏[4]依据模糊数学理论, 结合专家打分法和故障类型影响分析(Failure Mode Effect and Criticality Analysis, FMECA)风险分析法, 对胜利埕岛油田某段管道区内各种风险影响因素进行综合评价; 张方元[5]建立了海底管道故障树模型, 求出了故障树中所有的最小割集, 得到了管道失效概率, 实现了风险评价由定性到定量的转变; 杨娥[6]利用海底管道的未确知测度理论方法建立海底管道风险评价模型, 并采用置信度识别原则对风险评价结果进行处理, 增加了评价结果的可信度; 朱倩[7]利用灰色系统和模糊数学理论, 搭建海底管道系统的灰色模糊综合评价模型, 并以我国南海某海底输气管线为例, 开展海底管线实际工程的风险评估工作, 取得了加好的效果。

在前人研究海底管道风险评估方法的基础上, 本文排除管道自身材料和人为活动的影响, 以海洋环境因素作为风险源点开展研究, 结合故障树分析法和灰色模糊识别理论, 量化海洋环境因素, 构建

收稿日期: 2017-04-17; 修回日期: 2017-08-18

基金项目: 海洋公益性行业科研专项项目(201305026); 国家海洋局重点实验室开放研究基金课题(MATHAB201607)

[Foundation: Marine public welfare industry special scientific research projects, No.201305026; The state oceanic administration key laboratory open fund research, No.MATHAB201607]

作者简介: 李佳峻(1990-), 男, 广西梧州人, 硕士, 主要从事海底管道风险评估研究, 电话: 18930201890, 电子邮箱: 476494421@qq.com; 郭伟其, 通信作者, 教授级高工, 电话: 18930873068, E-mail: guoweiqi@eastsea.gov.cn

海洋环境因素灰色模糊评价体系。同时利用该体系对平湖油气田海底管道进行风险评估，并与 2014~2016 年平湖管道现场检测数据对比分析。

# 1 研究方法

## 1.1 评价原理

本文使用的评估方法是故障树分析法[8]和灰色模糊识别理论[7, 9-12]。故障树分析法是一种系统、规范的以图形描述事件的方法，它的特点是直观性强、灵活性好，对评价对象分析的过程就是对评价对象深入认识的过程；灰色模糊识别是将模糊数学与灰色系统相结合的理论，它的特点是结合两者研究不确定对象时的优点，用精确的数值来描述模棱两可的现象。

本文先以海底管道出露悬空为故障树的顶事件，分析出海洋环境中各项基本事件，构建针对海洋环境条件的海底管道故障树模型，再利用灰色模糊识别量化对海底管道安全有影响的海洋环境因素，并以层次分析法对每个风险因素进行分级赋权，确定评价指标范围和权重，建立针对海洋环境条件的海底管道风险评估体系。

## 1.2 海底管道故障树模型

将海底管道出露悬空看作是故障树的最高点事件，造成海底管道出露悬空的海洋环境因素可分为地质条件和海洋水文气象条件，将这两个因素作为故障树的次顶事件，以此类推，二级评价因素 10 个，三级评价因素 18 个，从而建立海洋因素海底管道故障树模型[13-17]，如图 1a 和图 1b 表示。

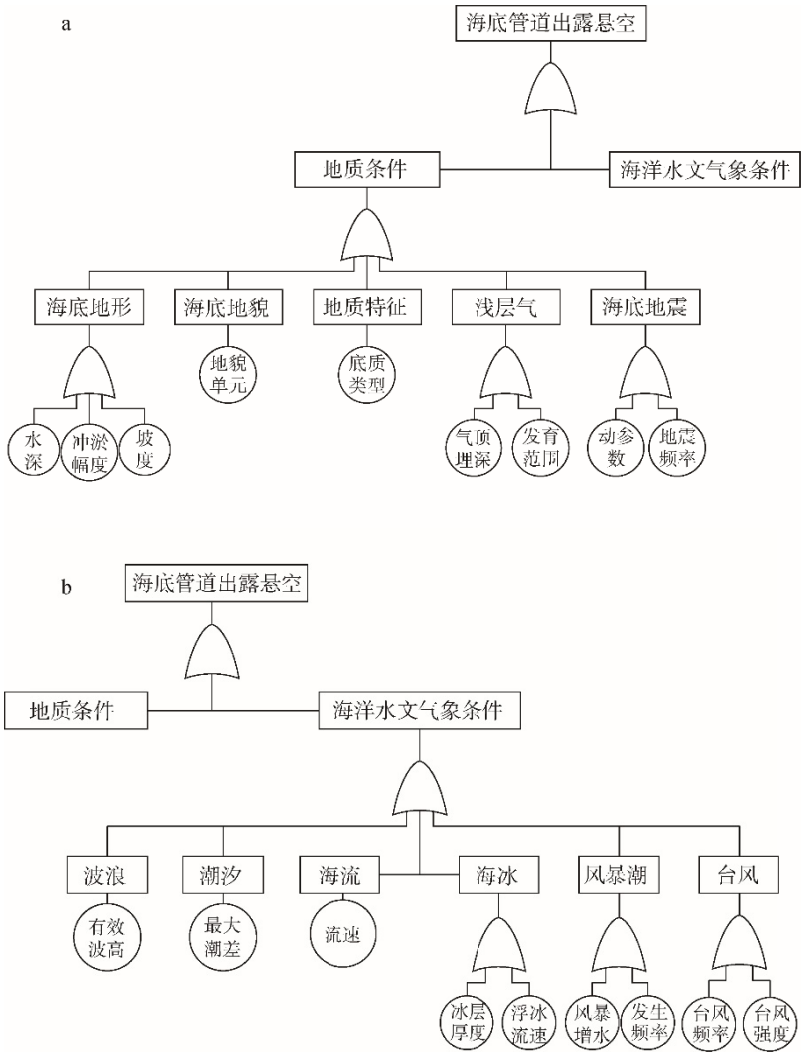



图 1 海底管道故障树模型的地质条件部分(a)和海洋水文气象条件部分(b)

Fig. 1 Geological conditions (a) and marine hydrological and meteorological conditions (b) of pipeline rupture fault tree model

## 1.3 灰色模糊评价

### 1.3.1 评价原理

将多级因素的权重、模糊关系和置信度归一化作为评判结果，具体评价方法如下:

设定$\boldsymbol{X}=\{x_1,x_2,\cdots,x_m\}$就是评价对象的因素集合,$\boldsymbol{Y}=\{y_1,y_2,\cdots,y_m\}$是每一个因素的具体评语集合,在$\boldsymbol{X}\times\boldsymbol{Y}$上$\underset{\otimes}{\tilde{\boldsymbol{R}}}$就是总评判基础上的灰色模糊关系，具体矩阵关系如下:

$$\underset{\otimes}{\tilde{\boldsymbol{R}}}=\begin{bmatrix}(u_{11},v_{11}) & (u_{12},v_{12}) & \cdots & (u_{1n},v_{1n})\\ (u_{21},v_{21}) & (u_{22},v_{22}) & \cdots & (u_{2n},v_{2n})\\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots\\ (u_{m1},v_{m1}) & (u_{m2},v_{m2}) & \cdots & (u_{mn},v_{mn})\end{bmatrix}=[(u_{ij},v_{ij})]_{m\times n}$$

上式中，$\underset{\otimes}{\tilde{\boldsymbol{R}}}$就是评判矩阵，模部隶属度$u_{ij}$就是元素$(x_i,y_i)$的模糊关系，灰部置信度$v_{ij}$就是灰色关系,也就是对$u_{ij}$判断数据或信息的充分程度，其具体定义为:

$$\underset{\otimes}{\tilde{\boldsymbol{A}}}=\{(a_1,v_A(a_1)),(a_2,v_A(a_2)),\ldots,(a_m,v_A(a_m))\}$$

上式为用层次分析法为各因素赋予恰当的权重分配得出的权重关系矩阵，$a_i$为计算得出的权重值,$v_A(a_i)$就是$a_i$的灰部置信度。

最后得到灰色模糊综合评判结果，$\underset{\otimes}{\tilde{\boldsymbol{R}}}$与$\underset{\otimes}{\tilde{\boldsymbol{A}}}$合成得:

$$\underset{\otimes}{\tilde{\boldsymbol{B}}}=\underset{\otimes}{\tilde{\boldsymbol{A}}}\circ\underset{\otimes}{\tilde{\boldsymbol{R}}}=(\tilde{\boldsymbol{A}}\circ\tilde{\boldsymbol{R}},\underset{\otimes}{\boldsymbol{A}}\circ\underset{\otimes}{\boldsymbol{R}})$$

### 1.3.2 海底管道风险因素集

依据海底管道故障树模型，得到多级灰色模糊综合评判因素集，如下所示。

$\boldsymbol{X}=\{\boldsymbol{x_1},\boldsymbol{x_2}\}=$ {地质条件,海洋水文气象条件};

地质条件$\boldsymbol{x_1}=\{\boldsymbol{x_{11}},\boldsymbol{x_{12}},\boldsymbol{x_{13}},\boldsymbol{x_{14}},\boldsymbol{x_{15}}\}=$ {海底地形，海底地貌，地质特征，浅层气，海底地震};

海洋水文气象条件$\boldsymbol{x_2}=\{\boldsymbol{x_{21}},\boldsymbol{x_{22}},\boldsymbol{x_{23}},\boldsymbol{x_{24}},\boldsymbol{x_{25}},\boldsymbol{x_{26}}\}=$ {波浪，潮汐，海流，海冰，风暴潮，台风};

海底地形$\boldsymbol{x_{11}}=\{x_{111},x_{112},x_{113}\}=$ {水深，冲淤幅度，坡度};

海底地貌$\boldsymbol{x_{12}}=\{x_{121}\}=$ {地貌单元};

地质特征$\boldsymbol{x_{13}}=\{x_{131}\}=$ {底质类型};

浅层气$\boldsymbol{x_{14}}=\{x_{141},x_{142}\}=$ {气顶埋深，发育范围};

海底地震$\boldsymbol{x_{15}}=\{x_{151},x_{152}\}=$ {动参数，地震频率}。

波浪$\boldsymbol{x_{21}}=\{x_{211}\}=$ {有效波高};

潮汐$\boldsymbol{x_{22}}=\{x_{221}\}=$ {最大潮差};

海流$\boldsymbol{x_{23}}=\{x_{231}\}=$ {流速};

海冰$\boldsymbol{x_{24}}=\{x_{241},x_{242}\}=$ {冰层厚度，浮冰流速};

风暴潮$\boldsymbol{x_{25}}=\{x_{251},x_{252}\}=$ {风暴增水，发生频率};

台风$\boldsymbol{x_{26}}=\{x_{261},x_{262}\}=$ {台风强度，台风频率}。

### 1.3.3 建立评判矩阵

模糊关系和灰色关系都是灰色模糊评判矩阵的内容。评价对象因素集和具体评语集二者之间的灰色模糊关系就是评判矩阵。评判矩阵指的就是在评判对象中确定每一个因素的模部隶属度，以及在信息的充分程度基础上给出相应的灰部置信度。在对模糊关系进行确定时，需要收集不同程度的信息量,鉴于此，在表达因素信息量的时候会有大量不可信的信息，当然也就导致不可信的模糊关系，在信息充分程度的基础上，我们可以用不同的灰部来描述模糊评判矩阵，具体分为五个等级灰部取值，分别为: 很贫乏，比较贫乏，一般，较充分，很充分。五个等级的灰度取值对应五个等级的取值，分别为: 0.81~1, 0.61~0.80, 0.41~0.60, 0.21~0.40, 0~0.20。以下是三级风险评价因素海底地形$x_{11}$的评判矩阵作为例子

$$\underset{\otimes}{\tilde{\boldsymbol{R}_{11}}}=\begin{bmatrix}(0,1) & (0,1) & (1,0.1) & (0,1) & (0,1)\\ (1,0.3) & (0,1) & (0,1) & (0,1) & (0,1)\\ (1,0.2) & (0,1) & (0,1) & (0,1) & (0,1)\end{bmatrix}$$

### 1.3.4 确定权重矩阵

由于各评价因素对风险的贡献大小不一，对各评价因素具有权衡轻重作用程度的数值就是权重,它反映了不同评价因子间的相对重要性。在层次分析法基础上，通过观察海底管道故障树模型，找到模型中的一级因素，并在此基础上确定正互反矩阵(模糊一致性判断矩阵)、一级因素和二级因素之间的判断矩阵以及二级因素和三级因素之间的判断矩阵。运算过程以二级风险评价因素海洋水文气象条件$\boldsymbol{x_2}$的权重判断矩阵作为例子(如表 1)。

表 1 海洋水文气象条件的权重判断矩阵$\boldsymbol{x_2}$

**Tab. 1 The weighted judgment matrix $\boldsymbol{x_2}$ of marine hydrological and meteorological conditions**

| $\boldsymbol{x_2}$ | $x_{21}$ | $x_{22}$ | $x_{23}$ | $x_{24}$ | $x_{25}$ | $x_{26}$ |
|---|---|---|---|---|---|---|
| $x_{21}$ | 1 | 2 | 1/3 | 2 | 1/2 | 1 |
| $x_{22}$ | 1/2 | 1 | 1/2 | 1/3 | 1 | 1 |
| $x_{23}$ | 3 | 2 | 1 | 2 | 3 | 3 |
| $x_{24}$ | 1/2 | 3 | 1/2 | 1 | 1/2 | 2 |
| $x_{25}$ | 2 | 1 | 1/3 | 2 | 1 | 2 |
| $x_{26}$ | 1 | 1 | 1/3 | 1/2 | 1/2 | 1 |

将判断矩阵进行正规化处理，得到

$$\begin{bmatrix} 0.125 & 0.200 & 0.111 & 0.255 & 0.077 & 0.100 \\ 0.063 & 0.100 & 0.167 & 0.043 & 0.154 & 0.100 \\ 0.375 & 0.200 & 0.333 & 0.255 & 0.077 & 0.300 \\ 0.063 & 0.300 & 0.167 & 0.128 & 0.462 & 0.200 \\ 0.250 & 0.100 & 0.111 & 0.255 & 0.154 & 0.200 \\ 0.125 & 0.100 & 0.111 & 0.064 & 0.077 & 0.100 \end{bmatrix}$$

对正规化矩阵进行行向量正规化，得到

$$\overline{\boldsymbol{W}_1} = 0.125 + 0.200 + 0.111 + 0.255 + 0.077 + 0.100 = 0.868$$
$$\overline{\boldsymbol{W}_2} = 0.063 + 0.100 + 0.167 + 0.043 + 0.154 + 0.100 = 0.626$$
$$\overline{\boldsymbol{W}_3} = 0.375 + 0.200 + 0.333 + 0.255 + 0.462 + 0.300 = 1.925$$
$$\overline{\boldsymbol{W}_4} = 0.063 + 0.300 + 0.167 + 0.128 + 0.077 + 0.200 = 0.934$$
$$\overline{\boldsymbol{W}_5} = 0.250 + 0.100 + 0.111 + 0.255 + 0.154 + 0.200 = 1.070$$
$$\overline{\boldsymbol{W}_6} = 0.125 + 0.100 + 0.111 + 0.064 + 0.077 + 0.100 = 0.577$$

$$\boldsymbol{W_1} = 0.145$$
$$\boldsymbol{W_2} = 0.104$$
$$\boldsymbol{W_3} = 0.321$$
$$\boldsymbol{W_4} = 0.156$$
$$\boldsymbol{W_5} = 0.178$$
$$\boldsymbol{W_6} = 0.096$$

求出最大特征值，得到

$$\boldsymbol{AW} = \boldsymbol{u_2} \cdot \boldsymbol{W} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{AW_1} \\ \boldsymbol{AW_2} \\ \boldsymbol{AW_3} \\ \boldsymbol{AW_4} \\ \boldsymbol{AW_5} \\ \boldsymbol{AW_6} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.957 \\ 0.663 \\ 2.098 \\ 0.983 \\ 1.183 \\ 0.619 \end{bmatrix}$$

$$\lambda_{\max} = \sum_{i=1}^{n} \frac{(\boldsymbol{AW})_i}{n\boldsymbol{W}_i} = 6.483$$

进行一致性检验，得到

$$I_{\mathrm{C}} = \frac{\lambda_{\max} - n}{n-1} = 0.097$$
$$R_{\mathrm{C}} = \frac{I_{\mathrm{C}}}{I_{\mathrm{R}}} = 0.0779 < 0.1$$

其中，$I_{\mathrm{C}}$为一致性指标，$R_{\mathrm{C}}$是随机一致性比例，$I_{\mathrm{R}}$是层次平均随机一致性指标。通过多次重复随机运算获得了 $I_{\mathrm{R}}$，判断矩阵的阶数和 $I_{\mathrm{R}}$ 的取值是有相关性的，当 $R_{\mathrm{C}}$ 小于 0.10 的时侯，说明权重判断矩阵满足一致性的要求，也就是说矩阵具备合理权数分配；如果 $R_{\mathrm{C}}$ 大于 0.10，说明权重判断矩阵不符合一致性的要求，需要进行调整。

经过计算，得到模型中的二级风险评价因素海洋水文气象条件$\boldsymbol{x_2}$的权重矩阵为[0.145, 0.104, 0.321, 0.156, 0.178, 0.096]，并确定其对应灰度，鉴于$\boldsymbol{x_2}$通过一致性检验，将 0 赋为各因素权重的点灰度值，即做出的重要性评判是有充足数据依托的。

$$\tilde{\boldsymbol{A}}_{\boldsymbol{2}} = [(0.145, 0)(0.104, 0)(0.321, 0)(0.156, 0)(0.178, 0)(0.096, 0)]$$

同理，我们可以得到各级评价因素的重要性权重矩阵为:

$$\tilde{\boldsymbol{A}} = [(0.667, 0)(0.333, 0)]$$
$$\tilde{\boldsymbol{A}}_{\boldsymbol{1}} = [(0.177, 0)(0.116, 0)(0.157, 0)(0.101, 0)(0.449, 0)]$$
$$\tilde{\boldsymbol{A}}_{\boldsymbol{11}} = [(0.164, 0)(0.539, 0)(0.297, 0)]$$
$$\tilde{\boldsymbol{A}}_{\boldsymbol{12}} = [(1, 0)]$$
$$\tilde{\boldsymbol{A}}_{\boldsymbol{13}} = [(1, 0)]$$
$$\tilde{\boldsymbol{A}}_{\boldsymbol{14}} = [(0.667, 0)(0.333, 0)]$$
$$\tilde{\boldsymbol{A}}_{\boldsymbol{15}} = [(0.25, 0)(0.75, 0)]$$
$$\tilde{\boldsymbol{A}}_{\boldsymbol{21}} = [(1, 0)]$$
$$\tilde{\boldsymbol{A}}_{\boldsymbol{22}} = [(1, 0)]$$
$$\tilde{\boldsymbol{A}}_{\boldsymbol{23}} = [(1, 0)]$$
$$\tilde{\boldsymbol{A}}_{\boldsymbol{24}} = [(0.25, 0)(0.75, 0)]$$
$$\tilde{\boldsymbol{A}}_{\boldsymbol{25}} = [(0.667, 0)(0.333, 0)]$$
$$\tilde{\boldsymbol{A}}_{\boldsymbol{26}} = [(0.25, 0)(0.75, 0)]$$

本文采用五阶度模糊语言构成的评语集，各个因素的在风险上具体标准分为：低风险，较低风险，中风险，较高风险和高风险这五级，即海底管道风险等级评语集为={优，良，中，较差，很差}。根据这样的评语等级，进一步确定分级子因素的具体标准，在描述定性风险因素的时候采用语言衡量[1]，利用具体分级范围将风险因素进行数值化。为确保评价的合理性，可对风险因素评价等级表内各项因素进行删减或调整等级区间以得到更详细地针对特定海区的因素评价等级体系表，调整后应重新确定各因素的权重。由于海洋环境系统的复杂性，因此其风险并不具有绝对的含义。

由此，可制作得出中国海海底管道风险因素评级等级体系表，见表 2。

## 2 研究实例背景

平湖海底管道处于长江水下三角洲南缘的杭州湾口和舟山群岛海域，于 1998 年建成投产，至今已运行十多年，管道由于长年受海流冲刷等多种因素的影响，近岸海区的管道容易出现长距离的出露和悬空。海底管道的出露和悬空状态影响了管道的安全运行，尤其是管道悬空给管道的正常运营带来了严重的安全隐患。为及时掌握平湖油气田海底管道的空间状态，查明平湖油气田海底管道路由海区海底的地形地貌，以制定相应的护管对策，建设单位常年开展平湖油气田海底管道路由检测和相关调查工作。

表 2　中国海海底管道风险因素评价等级体系表

Tab. 2　Rating system of China Sea seabed pipeline risk factor assessment

| 一级因素 | 权重 | 二级因素 | 权重 | 三级因素 | 权重 | 等级 | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | Ⅰ | Ⅱ | Ⅲ | Ⅳ | Ⅴ |
| 地质条件 | 0.667 | 海底地形 | 0.117 | 水深(m) | 0.164 | ≥100 | 50~100 | 20~50 | 5~20 | ≤5 |
| | | | | 冲淤幅度(cm/a) | 0.539 | ≤20 | 20~45 | 45~70 | 70~100 | ≥100 |
| | | | | 坡度(‰) | 0.297 | ≤1 | 1~3 | 3~4 | 4~7 | ≥7 |
| | | 海底地貌 | 0.116 | 地貌单元 | 1 | 海底平原 | 浅滩 | 水下岸坡 | 沙脊群区 | 海山区 |
| | | 地质特征 | 0.157 | 底质类型 | 1 | 黏土 | 砂黏土 | 黏质粉土 | 砂质粉土 | 砂土和淤泥 |
| | | 浅层气 | 0.101 | 气顶埋深(m) | 0.667 | ＞8 | 6~8 | 4~6 | 2~4 | ＜2 |
| | | | | 发育范围 | 0.333 | 无发育范围 | 可忽略的发育范围 | 可忽略的发育范围但有管道跨越 | 有发育范围 | 有明显的发育范围 |
| | | 海底地震 | 0.449 | 动参数(g) | 0.25 | ≤0.05 | 0.1 | 0.15 | 0.2 | ≥0.3 |
| | | | | 地震频度(次) | 0.75 | ≤1.0 | 1.0~4.0 | 4.0~10.0 | 10.0~14.0 | ≥14.0 |
| 海洋水文气象条件 | 0.333 | 波浪 | 0.145 | 有效波高(m)(10 年一遇) | 1 | ≤1.25 | 1.25~2.5 | 2.5~4.0 | 4.0~7.5 | ≥7.5 |
| | | 潮汐 | 0.104 | 最大潮差(m) | 1 | ≤3.0 | 3.0~4.0 | 4.0~5.0 | 5.0~6.0 | ≥6.0 |
| | | 海流 | 0.321 | 流速(m/s) | 1 | ≤1.0 | 1.0~2.0 | 2.0~3.0 | 3.0~4.0 | ≥4.0 |
| | | 海冰 | 0.156 | 冰层厚度(cm) | 0.25 | ≤10 | 10~35 | 35~50 | 50~80 | ≥80 |
| | | | | 浮冰流速(m/s) | 0.75 | ≤0.3 | 0.3~0.5 | 0.5~0.7 | 0.7~1.0 | ≥1.0 |
| | | 风暴潮 | 0.178 | 风暴增水 | 0.667 | 低 | 较低 | 中 | 较高 | 高 |
| | | | | 发生频率 | 0.333 | 低 | 较低 | 中 | 较高 | 高 |
| | | 台风 | 0.096 | 台风强度(级) | 0.25 | ≤7 | 7~9 | 9~11 | 11~12 | ≥12 |
| | | | | 台风频率(次/年) | 0.75 | ≤0.6 | 0.6~2.1 | 2.1~4.6 | 4.6~8.3 | ≥8.3 |

为真实客观评价管道风险，避免将整段管道一同评价而造成信息均等化的评价结果不能真实反映风险等级高的区段的情况出现，需根据水深潮汐、波浪、地质特征和海底地形等因素将管段进行分区评价。根据多年勘测结果，综合考虑水深和其他各种因素，将此段管道划分为 4 段, P1 分区为杭州湾开阔区, P2 分区为大洋山西侧岛屿边缘区，P3 分区为岱衢洋宽阔水道区, P4 分区为岱衢外海区，如图 2。与此同时，针对评价海区的实际海洋环境特点，得到平湖油气海底管道风险因素评价等级体系表(表 3)，使得评价结果更为客观合理(本文使用数据来源于上海东海海洋工程勘察设计研究院在 2014~2016 年上半年和下半年 6 次平湖油气田海底管道路由勘察的实测数据，包括：地形数据、浅地层剖面数据、侧扫声呐数据，以及收集的其他单位实测数据和资料。)

# 3　结果与分析

## 3.1　模型评价结果

根据平湖油气海底管道检测数据(表 4)和风险因素评级等级体系表要素，可得到平湖油气海底管道地质条件因素评估表(表 5)和海洋水文气象条件因素评估表(表 6)。

根据上述评价原理和灰色模糊评价模型，可计算得到灰色模糊综合评判结果，见表 7。

根据表 7 计算结果，P1 分区中最大的模部隶属度为 0.352，隶属于Ⅰ级风险，管道处在安全状态；P2 分区的最大模部隶属度为 0.312，归属Ⅱ级风险，处于相对安全的状态；P3 分区其最大隶属度为 0.386，是Ⅰ级风险，也处在安全状态；0.51 的最大模部隶属度说明 P4 分区为Ⅰ级风险，同样也是处在安全的系统。4 段分区评价结果的置信度均为 0.1，说明评价结果是可靠的。由此，可以得到风险等级排序为：P2>P1>P4>P3。

## 3.2　实际检测数据

本文依据多年平湖油气田海底管道检测数据,统计得出平湖油气海底管道检测状态表[18](表 8), P1 分区内管道处于出露状态的均值为–0.14 m，处于临界悬空状态的均值为–0.35 m，处于悬空状态的均值为

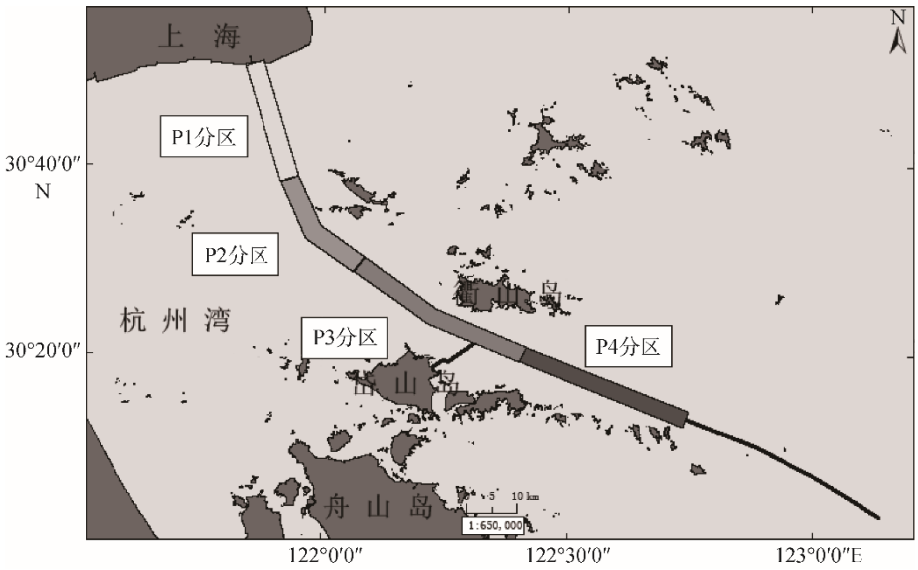



图 2　东海平湖油气田海底油气管道分区图

Fig. 2　Zone map of Pinghu oil and gas pipeline risk assessment

**表 3　平湖油气海底管道风险因素评价等级体系表**

**Tab. 3　Rating system of Pinghu oil and gas submarine pipeline risk factor assessment**

| 一级因素 | 权重 | 二级因素 | 权重 | 三级因素 | 权重 | 等级 | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | I | II | III | IV | V |
| 地质条件 | 0.667 | 海底地形 | 0.177 | 水深(m) | 0.164 | ≥25 | 20~25 | 15~20 | 10~15 | ≤10 |
| | | | | 冲淤幅度(cm/a) | 0.539 | ≤20 | 20~45 | 45~70 | 70~100 | ≥100 |
| | | | | 坡度(‰) | 0.297 | ≤1 | 1~3 | 3~4 | 4~7 | ≥7 |
| | | 海底地貌 | 0.116 | 地貌单元 | 1 | 海底平原 | 浅滩 | 水下岸坡 | 沙脊群区 | 海山区 |
| | | 地质特征 | 0.157 | 底质类型 | 1 | 黏土 | 砂黏土 | 黏质粉土 | 砂质粉土 | 砂土和淤泥 |
| | | 浅层气 | 0.101 | 气顶埋深(m) | 0.667 | >8 | 6~8 | 4~6 | 2~4 | <2 |
| | | | | 发育范围 | 0.333 | 无发育范围 | 可忽略的发育范围 | 可忽略的发育范围但有管道跨越 | 有发育范围 | 有明显的发育范围 |
| | | 海底地震 | 0.449 | 动参数(g) | 0.25 | ≤0.05 | 0.1 | 0.15 | 0.2 | ≥0.3 |
| | | | | 地震频度(次) | 0.75 | ≤1.0 | 1.0~4.0 | 4.0~10.0 | 10.0~14.0 | ≥14.0 |
| 海洋水文气象条件 | 0.333 | 波浪 | 0.152 | 有效波高(m)(10 年一遇) | 1 | ≤1.25 | 1.25~2.5 | 2.5~4.0 | 4.0~7.5 | ≥7.5 |
| | | 潮汐 | 0.140 | 最大潮差(m) | 1 | ≤3.0 | 3.0~4.0 | 4.0~5.0 | 5.0~6.0 | ≥6.0 |
| | | 海流 | 0.392 | 流速(m/s) | 1 | ≤0.8 | 0.8~1.2 | 1.2~1.6 | 1.6~2.0 | ≥2 |
| | | 风暴潮 | 0.192 | 风暴增水 | 0.667 | 低 | 较低 | 中 | 较高 | 高 |
| | | | | 发生频率 | 0.333 | 低 | 较低 | 中 | 较高 | 高 |
| | | 台风 | 0.124 | 风力(级) | 0.25 | ≤7 | 7~9 | 9~11 | 11~12 | ≥12 |
| | | | | 频率(次/年) | 0.75 | ≤0.6 | 0.6~2.1 | 2.1~4.6 | 4.6~8.3 | ≥8.3 |

–0.48 m, 进行管道回填工作后检测的均值为 0.23 m; P2 分区内管道处于出露状态的均值为–0.18 m, 处于临界悬空状态的均值为–0.35 m, 处于悬空状态的均值为–0.44 m, 进行管道回填工作后检测的均值为 0.26 m; P3 分区内管道处于出露状态的均值为–0.15 m, 处于临界悬空状态的均值为–0.30 m, 处于悬空状态的均值为–0.40 m, 且未检测出有进行回填工作的管段; P4 分区内管道处于出露状态的均值为–0.17 m, 处于临界悬空状态的均值为–0.36 m, 处于悬空状态的均值为–0.47 m, 且未检测出有进行回填工作的管段。

表 4　平湖油气海底管道检测数据列表
**Tab. 4　Pinghu oil and gas pipeline detection Data**

| 类别 | 年份 |
|---|---|
| 地形数据 | 2014、2015、2016(上、下半年各检测一次) |
| 浅地层剖面数据 | 2014、2015、2016(上、下半年各检测一次) |
| 侧扫声呐数据 | 2014、2015、2016(上、下半年各检测一次) |
| 检测报告 | 2014、2015、2016(上、下半年各一本) |

表 5　平湖油气海底管道地质条件因素评估表
**Tab. 5　Factor evaluation of Pinghu oil and gas pipeline geological conditions**

| $x_1$ | 因素 | 权重 | P1 | P2 | P3 | P4 | 置信度 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 海底地形 | 水深 | 0.164 | Ⅲ | Ⅲ | Ⅲ | Ⅱ | 0.1 |
| | 冲淤幅度 | 0.539 | Ⅰ | Ⅱ | Ⅱ | Ⅱ | 0.3 |
| | 坡度 | 0.297 | Ⅰ | Ⅱ | Ⅰ | Ⅰ | 0.2 |
| 海底地貌 | 地貌单元 | 1 | Ⅰ | Ⅲ | Ⅱ | Ⅰ | 0.1 |
| 地质特征 | 底质类型 | 1 | Ⅰ | Ⅰ | Ⅱ | Ⅱ | 0.1 |
| 浅层气 | 气顶埋深 | 0.667 | Ⅱ | Ⅱ | Ⅲ | Ⅱ | 0.2 |
| | 发育范围 | 0.333 | Ⅳ | Ⅲ | Ⅲ | Ⅲ | 0.4 |
| 海底地震 | 动参数 | 0.25 | Ⅰ | Ⅰ | Ⅱ | Ⅱ | 0.2 |
| | 地震频率 | 0.75 | Ⅰ | Ⅰ | Ⅰ | Ⅰ | 0.3 |

表 6　平湖油气海底管道海洋水文气象条件因素评估表
**Tab.6　Factor evaluation of Pinghu oil and gas pipeline marine hydrological and meteorological conditions**

| $x_2$ | 因素 | 权重 | P1 | P2 | P3 | P4 | 置信度 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 波浪 | 有效波高 | 1 | Ⅱ | Ⅱ | Ⅰ | Ⅰ | 0.2 |
| 潮汐 | 最大潮差 | 1 | Ⅲ | Ⅱ | Ⅰ | Ⅰ | 0.1 |
| 海流 | 流速 | 1 | Ⅴ | Ⅴ | Ⅳ | Ⅳ | 0.3 |
| 风暴潮 | 风暴增水 | 0.667 | Ⅲ | Ⅲ | Ⅱ | Ⅰ | 0.4 |
| | 发生频率 | 0.333 | Ⅱ | Ⅱ | Ⅱ | Ⅱ | 0.2 |
| 台风 | 风力 | 0.25 | Ⅱ | Ⅱ | Ⅱ | Ⅱ | 0.3 |
| | 频率 | 0.75 | Ⅰ | Ⅰ | Ⅰ | Ⅰ | 0.2 |

表 7　平湖油气海底管道模糊评价汇总表
**Tab. 7　Fuzzy evaluation summary of Pinghu oil and gas pipeline**

| 分区 | 模部隶属度 | | | | | 置信度 | 风险等级 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Ⅰ | Ⅱ | Ⅲ | Ⅳ | Ⅴ | | |
| P1 | 0.352 | 0.187 | 0.189 | 0.011 | 0.261 | 0.1 | Ⅰ |
| P2 | 0.281 | 0.312 | 0.145 | 0 | 0.262 | 0.1 | Ⅱ |
| P3 | 0.386 | 0.309 | 0.043 | 0.262 | 0 | 0.1 | Ⅰ |
| P4 | 0.51 | 0.217 | 0.011 | 0.261 | 0 | 0.1 | Ⅰ |

表 8　平湖油气海底管道检测状态表
**Tab. 8　Detection state of Pinghu oil and gas pipeline**

| 管道状态 | 出露(m) | 临界悬空(m) | 悬空(m) | 回填(m) |
|---|---|---|---|---|
| P1 分区 | –0.14 | –0.35 | –0.48 | 0.23 |
| P2 分区 | –0.18 | –0.35 | –0.44 | 0.26 |
| P3 分区 | –0.15 | –0.3 | –0.40 | 无 |
| P4 分区 | –0.17 | –0.36 | –0.47 | 无 |

对比各分区，管道出露状态排序为 P2>P4>P3>P1，管道临界悬空状态排序为 P4>P2=P1>P3，管道悬空状态排序为 P1>P4>P2>P3，加上 P1 和 P2 分区存在管道回填的情况，所以排序情况应调整为：管道出露状态排序为 P2>P1>P4>P3，管道临界悬空状态排序为 P2>P1>P4>P3，管道悬空状态排序为 P1>P2>P4>P3。因此，管道的风险等级排序为：P2>P1>P4>P3，与灰色模糊综合评判结果一致，说明评价结果符合实际情况，模型可信，对实际有指导意义。

### 3.3 分析与讨论

在平湖油气海底管道灰色模糊评价模型中，地震中的动参数和地震频度，以及冲淤幅度、有效波高、底质类型在四个分区间内虽占有较大比重，但差异不大，因此对管道的风险等级影响是相同的；水深、气顶埋深、最大潮差、风暴增水、坡度、风暴潮发生频率、台风强度、台风频率等参数虽然在四个分区内各有差异，但其权重较小，因此对管道的风险等级评定的影响有限；地貌单元和流速在四个分区间内差异和比重都很大，因此这两项是对管道的风险等级评定起着决定性的作用。

P2 分区靠近岛屿，海流流速较高，水深较浅，且浅层气广泛发育，因此水深、地貌单元和浅层气发育范围被评价为Ⅲ级；冲淤幅度、有效波高和最大潮差这三项因素都被评价为Ⅱ级，这使得 P2 分区最终评价结果为Ⅱ级风险。从风险评估后得出的结果看，本次评估中有 3 个分区都是处于Ⅰ级风险，即系统处于安全的状态，只有 P2 分区是处于Ⅱ级风险，相对安全的状态。

## 4 结论

本文引入故障树分析法，构建了针对海洋环境条件的海底管道故障树模型；再利用灰色模糊识别与层次分析法对每个风险因素分级赋权，量化环境风险因素，构建海洋环境条件的海底管道风险评价体系。同时，将上述评价体系应用于平湖油气海底管道风险评价中，评价结果与现场数据检测结果一致，说明了该体系的合理性和实用性，为风险管控提供科学理论支持。由于本文风险体系中仅考虑了海洋环境因素，有一定的局限性，下一步将人类海洋开发活动和其他风险因素引入模型中，构建更为综合的风险评价体系。

参考文献：


[1] W·肯特·米尔鲍尔. 管道风险管理指南——理念、技术及资源[M]. 北京：石油工业出版社, 2014.
Muhlbauer W K. Pipeline risk management manual ideas, techniques and resources[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2014.

[2] 董丽丽. 基于灰色模式识别理论的海底管道系统的路由定量风险评估[D]. 天津：天津大学, 2003.
Dong Lili. Submarine Pipeline Routing Risk Quantitative Assessment based on grey-mode identification theory[D]. Tianjin: Tianjin Universty, 2003.

[3] 谢云杰. 海底油气管道系统风险评价技术研究[D]. 成都：西南石油大学, 2007.
XIE Yunjie. Study on submarine pipeline risk assessment system[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2007.

[4] 丁鹏. 海底管线安全可靠性及风险评价技术研究[D]. 青岛：中国石油大学, 2008.
Ding Peng. Research on Safety Reliability and RIsk Assement of Submarine Pipeline[D]. Qingdao: China University of Petroleum, 2008.

[5] 张方元. 定量风险分析(QRA)及其在海底管道完整性管理方面的应用[D]. 哈尔滨：哈尔滨工程大学, 2010.
Zhang fangyuan. Submarine Pipeline Quantitative Risk Assessment(ORA) and Its Application in Integrity Management[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2010.

[6] 杨娥. 海底管道风险评价研究[D]. 成都：西南石油大学, 2012.
YANG E. Study on submarine pipeline risk assessment[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2012.

[7] 朱倩. 海底管线系统的风险评估技术研究[D]. 大连：大连理工大学, 2013.
Zhu Qian. Study on submarine pipeline risk assessment system[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2013.

[8] 杨慧来. 长输油气管道定量风险评价方法研究[D]. 兰州：兰州理工大学, 2009.
Yang Huilai. The Research on Some Chemical and Physical Test Methods in the Chemical and Fiber Production Process[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2009.

[9] 陶从江，吴萍. 模糊集合与普通集合基本运算的比较研究[J]. 商情, 2011, 48: 155.
Tao Congjiang, Wu Ping. The fuzzy set and common set a comparative study of the basic computing[J]. ShangQing, 2011, 48: 155.

[10] 杨纶标，高英仪. 模糊数学原理及应用(第四版)[M]. 广州：华南理工大学出版社, 2006.
Yang Lunbiao, Gao Yingyi. The principle and application of fuzzy mathematics (The fourth edition)[M]. Guangzhou: South China University of Technology Press, 2006.

[11] 刘思峰，郭天榜，党要国. 灰色系统理论及其应用

(第二版)[M]. 北京: 科学出版社, 1999.
Liu Sifeng, Guo Tianbang, Dang Yaoguo. The grey system theory and its application (The second edition)[M]. Beijing: Science Press, 1999.

[12] 吕妍, 魏文普, 张兆康, 等. 海洋石油平台溢油风险评价研究[J]. 海洋科学, 2014, 1: 33-38.
Lü Yan, Wei Wenpu, Zhang Zhaokang, et al. Risk assessment of oil spill on the offshore platform[J]. Marine Sciences, 2014, 1: 33-38.

[13] 陈倩, 黄大吉, 章本照, 等. 浙江近海潮流和余流的特征[J]. 东海海洋, 2003, 21(4): 1-14.
Chen Qian, Huang Daji, Zhang Benzhao, et al. Characteristics of the tidal current and residual current in the seas adjacent to Zhejiang[J]. Donghai marine science, 2003, 21(4): 1-14.

[14] 朱继伟, 邱长林, 闫澍旺. 液化土中海底管线的运动与受力分析[J]. 石油工程建设, 2000, 26(1): 11-14.
Zhu Jiwei, Qiu Changlin, Yan Shuwang. The Movement and Forcing Analysis on Subsea Pipeline under Liquefied Soil[J]. Petroleum engineering construction, 2000, 26(1): 11-14.

[15] 刘乐军, 傅命佐, 李家钢, 等. 荔湾 3-1 气田海底管道深水段地质灾害特征[J]. 海洋科学进展, 2014, 32(2): 162-174.
Liu Yuejun, Fu Mingzuo, Li Jiagang, et al. Geologic Hazards in the Deep Pipeline Routing Area of the Liwan 3-1 Gas Field in the South China Sea[J]. Advances in Marine Science, 2014, 32(2): 162-174.

[16] 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.
Li Ping, Du Jun, Liu Yuejun, et al. Distribution characteristics of the shallow gas in Chinese offshore seabed[J]. The chinese journal of geological hazard and control, 2010, 21(1): 69-74.

[17] 王茜, 赵建平. 海底管道第三方破坏失效分析及对策[J]. 石油化工设备, 2007, 36(3): 18-21.
Wang Qian, Zhao Jianping. Reasons for Failure of Third-Party Damage of Offshore Pipelines and the Measures[J]. Petro-chemical equipment, 2007, 36(3): 18-21.

[18] 庄丽华, 阎军, 李成钢. 海底管道悬空防护与治理措施浅谈[J]. 海洋科学, 2016, 40(11): 65-73.
Zhuang Lihua, Yan Jun, Li Chenggang. Discussion on measures taken to protect submarine pipelines from hanging[J]. Marine Scicences, 2016, 40(11): 65-73.

# Quantitative assessment of environmental risk for exposed and dangling marine pipeline

LI Jia-jun[1, 3], GUO Wei-qi[2, 3], ZHANG Jie[2, 3], CHEN Xin-xi[2, 3]

(1.College of Marine Science, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 2.East Sea Marine Environmental Investigating & Surveying Center, SOA China, Shanghai 200137, China; 3. Shanghai East Sea Marine Engineering Survey & Design Institute, Shanghai 200137, China)

**Received:** Apr. 17, 2017
**Key words:** Pinghu oil and gas pipeline; environmental risk assessment; comprehensive evaluation model of grey fuzzy; marine factor

**Abstract:** The submarine pipeline, whose operating conditions are directly related to the safety of the offshore oil and gas fields and quality of the marine ecological environment, is a major route of marine oil and gas transportation. In this study, an exposed and dangling submarine pipeline was used as the top of the fault tree to analyze the basic events of the marine environment. Subsequently, a submarine pipeline fault tree model for the marine environment was developed. Then, based on the theory of grey fuzzy identification, a risk assessment system of the submarine pipeline was established based on the grey fuzzy recognition theory and the analytic hierarchy process for each enhanced risk factor. With the above system, the environmental risk assessment of the submarine pipeline in the Pinghu oil and gas field was divided into four segments and risk assessment was carried out to avoid the equalization of information caused by the evaluation of the entire pipeline. The evaluation results cannot truly reflect the situation of the high-stakes segments. A comparison between the evaluation results and the on-site data from 2014 to 2016 showed that the risk level of the submarine pipeline in the P2 segment was higher than those in other segments. It was demonstrated that this model is reasonable and practical.

(本文编辑: 李晓燕)