

中文引用格式:魏凯,王晨阳,吴德胜,等. 基于邻井灰色信息的钻井风险评价方法[J]. 中国安全科学学报,2024,34(6):99-108.

英文引用格式:WEI Kai, WANG Chenyang, WU Desheng, et al. Drilling risk analysis approach based on historical grey information of adjacent wells [J]. China Safety Science Journal,2024,34(6):99-108.

基于邻井灰色信息的钻井风险评价方法*

魏凯^{1,2}副教授,王晨阳^{1,2},吴德胜³,郭勇³,廖华林⁴教授

(1 长江大学 油气钻完井技术国家工程研究中心,湖北 武汉 430100;2 长江大学 油气钻采工程湖北省重点实验室,湖北 武汉 430100;3 中国石油新疆油田分公司 工程技术研究院,新疆 克拉玛依 834000;4 中国石油大学(华东) 石油工程学院,山东 青岛 266580)

中图分类号:X913.4

文献标志码:A

DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2024.06.1575

基金项目:国家自然科学基金资助(52174017);油气钻采工程湖北省重点实验室开放基金资助(YQZC202104);自然资源部地热资源重点实验室开放基金资助(Kldgr2022g05)。

【摘要】 为解决油气开发过程中未知地层钻井风险难以预测的问题,基于邻井灰色信息提出钻井风险评价方法。首先采用三参数区间灰数描述地层信息;其次采用深度平差和加权差值方法,根据邻井灰色信息构建目标井灰色井筒信息矩阵,并在此基础上建立三参数灰色安全钻井液密度窗口;然后依据广义强度—干涉理论,建立包括溢流、井漏、坍塌及吸附卡等风险的评价模型;最后对西部某油田的5口井进行实例分析。结果表明:引入的井筒信息矩阵概念,描述和计算深度平差和加权插值优化参数,构建目标井井筒信息剖面;利用三参数区间灰数和井筒信息矩阵构建的灰色安全钻井液密度窗口,大幅降低钻井风险评估中的不确定性;基于广义强度—干涉理论的钻井风险评价模型得出的评估结果与实际工况一致。

【关键词】 邻井灰色信息; 钻井风险; 三参数区间灰数; 井筒信息矩阵; 安全钻井液密度窗口

Drilling risk analysis approach based on historical grey information of adjacent wells

WEI Kai^{1,2}, WANG Chenyang^{1,2}, WU Desheng³, GUO Yong³, LIAO Hualin⁴

(1 National Engineering Research Center for Oil & Gas Drilling and Completion Technology, Yangtze University, Wuhan Hubei 430100, China; 2 Hubei Key Laboratory of Oil and Gas Drilling and Production Engineering, Yangtze University, Wuhan Hubei 430100, China; 3 Engineering Technology Research Institute, PetroChina Xinjiang Oilfield Company, Karamay Xinjiang 834000, China; 4 School of Petroleum Engineering, China University of petroleum, Qingdao Shandong 266580, China)

Abstract: To address the low prediction performance of drilling risks in unknown formations during oil and gas development, a drilling risk assessment approach based on grey adjacent well information was proposed. Firstly, a three-parameter interval grey number was proposed to present formation information. Secondly, the depth adjustment and weighted interpolation methods were used to develop a target well gray wellbore information matrix based on adjacent well information. Subsequently, a three-parameter grey

safety drilling fluid density window was proposed. Then, a risk assessment model including overflow, well leakage, collapse, and adhesion was developed based on generalized strength-interference theory. Finally, a case study was performed on five wells in an oil field in western China. The results indicated that introduced concept of wellbore information matrix and optimization parameter description of depth adjustment and weighted interpolation effectively presented the profile of the target well's wellbore information. The grey safe drilling fluid density window developed by three-parameter interval grey numbers and wellbore information matrix significantly reduced uncertainty in drilling risk assessment. The evaluation results from drilling risk assessment model based on generalized strength-interference theory agreed well with that in real situations, providing reliable fundamental knowledge for drilling risk assessment.

Keywords: adjacent well grey information; drilling risk; three-parameter interval gray number; wellbore information matrix; safety drilling fluid density window

0 引言

钻井是勘探开发地下石油、天然气等常规能源的关键工序,钻井风险会严重影响钻井作业、延长作业周期、增加钻井成本。工程实践认为^[1],钻井地质环境的复杂性和不确定性是导致钻井风险的关键因素,常规地震^[2]、录井^[3]等方法可以获得地质信息,但这些信息精度不足或在开钻之前无法获取,不利于钻井风险评价。而同一区块邻井的沉积环境以及构造运动与目标井类似,其地质信息和目标井地质信息具有一定关系,可采用邻井信息描述目标井地质信息,并提出钻井风险评价方法。

针对邻井信息的应用,传统方法一般采用反距离加权法或块金法构建目标井地层参数剖面。相比于传统的以数值点表征地层信息的方式,带有区间特征的灰数或概率分布函数能够将地层参数真值及其风险特征涵盖在内。目前,众多学者通过两参数区间灰数^[4]或概率分布函数^[5]表征具有不确定性的区间灰数,并评价钻井风险,然而存在以下问题:①概率分布函数复杂,计算困难;②用两参数区间灰数表示一个参量时,有时为了覆盖整个取值范围,区间可能会取的过大,这时如再认为整个区间内取值机会均等,得出的结果就会产生较大误差。为解决这个问题,考虑在两参数区间灰数内增加1个取值可能性最大的参数,使两参数区间灰数变成三参数区间灰数^[6],不仅保持了参数取值的区间范围,而且还能突出取值可能性最大的重心(即在区间内取值可能性最大的那个数),因此,采用三参数区间灰数描述地质参数更合理,但是目前对于三参数区间灰数信息下的钻井风险评价仍相对匮乏。

考虑到邻井灰色信息(简称邻井信息)对钻井

风险评价具有借鉴意义,以及复杂的钻井地质环境和邻井信息在移植过程中产生的不确定性问题,笔者拟提出采用含可信度的三参数区间灰数描述地层参数不确定性的方法和井筒信息矩阵的概念,建立基于邻井信息的三参数灰色安全钻井液密度窗口,并根据广义强度-干涉理论建立钻井风险的评价模型,以为智能钻井风险评价提供有效的方法。

1 三参数区间灰数表征法则

灰数是指只知道取值范围而不知道确切取值的模糊数^[7],通常用符号 \otimes 表示;区间灰数是指既有上界 \bar{a} 又有下界 \underline{a} 的灰数,记为 $a(\otimes) \in (\underline{a}, \bar{a})$,且 $\underline{a} \leq \bar{a}$;三参数区间灰数指取值可能性最大的重心点 \tilde{a} 已知的区间灰数,记为 $a(\otimes) \in (\underline{a}, \tilde{a}, \bar{a})$,且 $\underline{a} \leq \tilde{a} \leq \bar{a}$ 。

为了表示三参数区间灰数的取值分布信息,给出区间灰数3个参数的取值概率。例如:假定某地质参数为1个三区间灰数 $p(\otimes)$,若已知其取值范围和取值可能性最大的数,则该地质参数可以表示为:

$$\begin{cases} p(\otimes) \in [p(\underline{w}), \tilde{p}(\tilde{w}), \bar{p}(\bar{w})] (\underline{p} \leq \tilde{p} \leq \bar{p}) \\ \int_{\underline{p}}^{\bar{p}} f(p) = 1 \end{cases} \quad (1)$$

式中: \underline{p}, \bar{p} 分别为地质参数 $p(\otimes)$ 取值的上限和下限; \tilde{p} 为重心,表示地质参数 $p(\otimes)$ 取值可能性最大的值; $\underline{w}, \tilde{w}, \bar{w}$ 分别为下限、重心和上限对应的概率,即可信度。以三参数区间灰数表示的地质参数

$p(\otimes)$ 的概率分布函数,如图 1 所示。

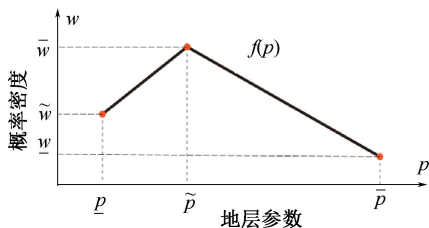


图 1 三参数区间灰数的典型分布函数

Fig. 1 Typical distribution function of a three-parameter interval gray number

当 3 个参数中的“重心”点与其中 1 个端点值相同时,三参数区间灰数退化为区间灰数,当三参数

$$\left\{ \begin{array}{l}
 ka(\otimes) \in [ka, k\tilde{a}, k\bar{a}] \quad (k \geq 0) \\
 ka(\otimes) \in [k\bar{a}, k\tilde{a}, ka] \quad (k \leq 0) \\
 a(\otimes)^n \in [\underline{a}^n, \tilde{a}^n, \bar{a}^n] \quad (n \geq 0) \\
 k^a(\otimes) \in [k^{\underline{a}}, k^{\tilde{a}}, k^{\bar{a}}] \quad (k \leq 0) \\
 a(\otimes) \pm b(\otimes) \in [(\underline{a} \cdot \underline{w}^a) \pm (\underline{b} \cdot \underline{w}^b), (\tilde{a} \cdot \tilde{w}^a) \pm (\tilde{b} \cdot \tilde{w}^b), (\bar{a} \cdot \bar{w}^a) \pm (\bar{b} \cdot \bar{w}^b)] \\
 a(\otimes) \times b(\otimes) \in \left[\begin{array}{l}
 \min((\underline{a} \cdot \underline{w}^a) \cdot (\underline{b} \cdot \underline{w}^b), (\underline{a} \cdot \underline{w}^a) \cdot (\bar{b} \cdot \bar{w}^b), (\bar{a} \cdot \bar{w}^a) \cdot (\underline{b} \cdot \underline{w}^b), \\
 (\bar{a} \cdot \bar{w}^a) \cdot (\bar{b} \cdot \bar{w}^b)), (\tilde{a} \cdot \tilde{w}^a) \cdot (\tilde{b} \cdot \tilde{w}^b), \\
 \max((\underline{a} \cdot \underline{w}^a) \cdot (\underline{b} \cdot \underline{w}^b), (\underline{a} \cdot \underline{w}^a) \cdot (\bar{b} \cdot \bar{w}^b), (\bar{a} \cdot \bar{w}^a) \cdot (\underline{b} \cdot \underline{w}^b), \\
 (\bar{a} \cdot \bar{w}^a) \cdot (\bar{b} \cdot \bar{w}^b))
 \end{array} \right] \\
 a(\otimes)/b(\otimes) \in \left[\begin{array}{l}
 \min((\underline{a} \cdot \underline{w}^a)/(\underline{b} \cdot \underline{w}^b), (\underline{a} \cdot \underline{w}^a)/(\bar{b} \cdot \bar{w}^b), (\bar{a} \cdot \bar{w}^a)/(\underline{b} \cdot \underline{w}^b), \\
 (\bar{a} \cdot \bar{w}^a)/(\bar{b} \cdot \bar{w}^b)), (\tilde{a} \cdot \tilde{w}^a) \cdot (\tilde{b} \cdot \tilde{w}^b), \\
 \max((\underline{a} \cdot \underline{w}^a)/(\underline{b} \cdot \underline{w}^b), (\underline{a} \cdot \underline{w}^a)/(\bar{b} \cdot \bar{w}^b), (\bar{a} \cdot \bar{w}^a)/(\underline{b} \cdot \underline{w}^b), \\
 (\bar{a} \cdot \bar{w}^a)/(\bar{b} \cdot \bar{w}^b))
 \end{array} \right]
 \end{array} \right. \quad (2)$$

2 灰色安全钻井液密度窗口构建

钻井液安全密度窗口是井身结构设计和安全钻进的基础数据^[8],通常由地层孔隙压力 F_p 、地层坍塌压力 F_c 及地层破裂压力 F_k 构成静力学条件下的钻井液安全密度窗口^[9]。为保证钻进安全,井筒内的压力系统需满足以下平衡关系:

表 1 安全钻井液密度窗口的边界条件

Table 1 Boundary conditions of safe drilling fluid density window

安全钻井液类型	安全密度窗口边界条件
井涌钻井液密度下限值 $\rho_k(h)$	$\rho_k(h) = F_p(h) + S_b + \Delta\rho$
井壁坍塌钻井液密度下限值 $\rho_c(h)$	$\rho_c(h) = F_c(h) + S_b$
压差卡钻钻井液密度上限值 $\rho_{sk}(h)$	$\rho_{sk}(h) = F_p(h) + \Delta F / (h \times 0.0098)$
防井漏钻井液密度上限值 $\rho_l(h)$	$\rho_l(h) = F_f(h) - S_g - S_c$
压井井漏钻井液密度上限值 $\rho_{kl}(h)$	$\rho_{kl}(h) = F_f(h) - S_g - S_k \times h_{F_{max}} / h$

注: h 为井深, m; S_b 为抽汲压力系数, g/cm^3 ; S_g 为激动压力系数, g/cm^3 ; $\Delta\rho$ 为附加钻井液密度, g/cm^3 ; S_f 为压裂安全系数, g/cm^3 ; S_c 为循环压耗系数, g/cm^3 ; S_k 为井涌允量系数, g/cm^3 ; ΔF 为压差允值, g/cm^3 ; $h_{F_{max}}$ 为裸眼井段最大地层孔隙压力处的深度, m。

完全相同时,退化为实数,因此,区间灰数和实数是三参数区间灰数的特例。采用三参数区间灰数来表示地质参数的灰色模糊特征,既保证了区间灰数的取值范围,又突出了灰数取值可能性最大的“重心”点,弥补了灰数“贫信息”的不足,使表征形式更符合人们的思维方式和地层参数的不确定性特征。

类似于区间灰数的运算法则,可以进行三参数区间灰数的基本运算。假设有 2 个三参数区间灰数 $a(\otimes) \in [\underline{a}(w^a), \tilde{a}(\tilde{w}^a), \bar{a}(w^a)]$ ($\underline{a} \leq \tilde{a} \leq \bar{a}$)、 $b(\otimes) \in [\underline{b}(w^b), \tilde{b}(\tilde{w}^b), \bar{b}(w^b)]$ ($\underline{b} \leq \tilde{b} \leq \bar{b}$), 其运算法则如下:

$$\max\{\rho_k, \rho_c\} \leq \rho_d \leq \min\{\rho_l, \rho_{sk}\}, \rho_{ki} \leq \rho_l \quad (3)$$

式中: ρ_d 为钻井液密度, g/cm^3 ; ρ_{ki} 为发生井涌风险压井后的钻井液密度, g/cm^3 ; $\rho_k, \rho_c, \rho_l, \rho_{sk}$ 分别为考虑工程因素(设计系数)后防止井筒发生井涌、坍塌、漏失及压差卡钻的当量钻井液密度临界值, g/cm^3 , 其边界条件见表 1。

安全钻井液密度窗口是影响钻井安全的关键因素,但是受客观地质条件的复杂性、不确定性及技术水平的有限性等因素影响,在利用已钻邻井资料预测同一区域的目标井安全钻井液密度窗口时,会产生较大的不确定性,具有灰色属性,可将其称为灰色安全钻井液密度窗口。为便于科学表征和计算,将井深、参数下限、参数重心、参数上限设置为矩阵的形式,构建三参数区间灰数井筒信息矩阵,描述单井地质剖面。

$$M_b = [H, P] = [H, \underline{p}, \tilde{p}, \bar{p}] \quad (4)$$

式中: M_b 为井筒矩阵,由深度和参数 2 部分组成; H 为一维的深度列阵; P 为一维参数矩阵,对于三参数区间灰数,由下限列阵 \underline{p} 、重心列阵 \tilde{p} 和上限列阵 \bar{p} 等 3 部分组成。

由于受地层的起伏、厚度变化、延伸趋势以及断层的影响,利用区域内的邻井信息构建安全钻井液密度窗口时,需要充分考虑地层的空间展布及井间距离^[10],因此,在构建目标井灰色安全钻井液密度窗口时,分别采用加权插值处理邻井的三参数区间灰数井筒矩阵的深度列阵和参数矩阵。

2.1 邻井灰色井筒矩阵深度平差

根据工程实践的地层对比可知:受地层起伏、厚度变化、延伸趋势以及断层的影响,目标井(WO)与邻井(WA、WB、WC、WD)的地层埋藏深度和厚度不一定相等,如图 2 所示。因此,将邻井地层信息向目标井移植时,需深度平差处理邻井地层信息。

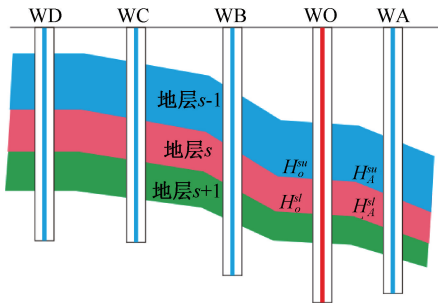


图 2 不同井间的地层对比

Fig. 2 Comparisons of stratigraphic between different wells

以图 2 为例,将邻井 WA 的 s 地层信息向目标井 WO 移植时,需首先将 WA 的上界 H_A^{su} 和下界 H_A^{sl} 向目标井 s 地层的上界 H_o^{su} 和下界 H_o^{sl} 变换。因此,第 j 口邻井的井筒深度矩阵经深度平差处理后变为:

$$H_j^s = \begin{bmatrix} H_o^{su} - \frac{H_j^{su}(H_o^{sl} - H_o^{su})}{H_j^{sl} - H_j^{su}} \\ \vdots \\ 1 \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix} + \frac{H_o^{sl} - H_o^{su}}{H_j^{sl} - H_j^{su}} \begin{bmatrix} h_j^{ku} \\ \vdots \\ h_j^{kn} \\ \vdots \\ h_j^{kl} \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中: H_j^s 为深度平差处理后邻井 j 的地层 s 的深度列向量, m ; H_o^{su} 、 H_o^{sl} 分别为目标井 WO 的地层 s 的上界深度和下界深度, m ; H_j^{su} 、 H_j^{sl} 分别为邻井 j 的地层 s 的上界深度和下界深度, m ; h_j^{kn} 为邻井 j 的某深度处的井深, m 。

2.2 邻井灰色井筒矩阵反距离加权插值

对于同一区块,假设岩层内部连续,同岩层为横向各向同性体,由于邻井与目标井之间的距离不同,各井对于目标井的地层参数的影响不同,通常认为离目标井距离越近的邻井对该目标井地层信息影响越大,越远的邻井影响越小^[11]。因此,将距离作为加权因子修正井筒的地层参数矩阵。

假设有 Z 口已钻邻井,并建立各层段的地层压力矩阵,目标井目标点坐标为 (N_o, E_o, H_o) 与该点地质参数相似的邻井上的对应点坐标为 (N_j, E_j, H_j) , $(j=1, 2, \dots, Z)$, 点的空间距离关系如图 3 所示。

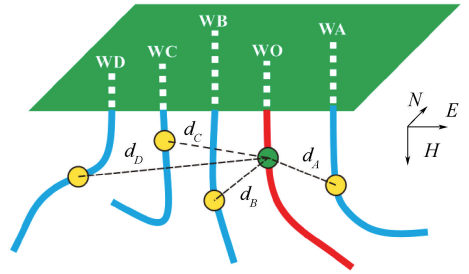


图 3 地质参数相似点空间距离

Fig. 3 Spatial distance between similar points of geological parameters

对于定向井,井眼轨迹参数会影响邻井与目标井对应点间的距离,根据反距离加权插值方法,第 j 口井在目标井 s 地层的参数列向量为:

$$P_j^s = \frac{1}{\sum_j \frac{1}{d_j^\lambda}} [p_j^{ku} \quad \dots \quad p_j^{kn} \quad \dots \quad p_j^{kl}]^T$$

$$d_j = \sqrt{(H_o - H_j)^2 + (N_o - N_j)^2 + (E_o - E_j)^2}$$

$$j = 1, 2, \dots, Z \quad (6)$$

式中: P_j^s 为反距离加权插值后邻井 j 的地层 s 的

层参数列向量; d_j 为邻井上的某点 (N_j, E_j, H_j) 到目标井上的某点 (N_o, E_o, H_o) 的空间距离; λ 为加权幂指数, 其通常大于 0 的常数, 加权幂指数 λ 越大, 邻井信息对目标井的影响越大; Z 为邻井数量。

2.3 目标井灰色安全钻井液密度窗口构建

通过邻井信息可得到多个深度平差和反距离加权插值后的井筒矩阵, 这些矩阵在一定程度上反映了目标井的地层信息。

1) 邻井数量较多时, 灰数的三参数可以通过邻井信息统计得到。这些参数的最小值为目标井地质区间灰数的下限:

$$(p_j^{kn})_{\min} = \min \left(\frac{1}{\sum_j \frac{1}{d_j^\lambda}} p_1^{kn}, \dots, \frac{1}{\sum_j \frac{1}{d_j^\lambda}} p_j^{kn}, \dots, \frac{1}{\sum_j \frac{1}{d_j^\lambda}} p_Z^{kn} \right) \quad (7)$$

最大值为区间灰数的上限值:

$$(p_j^{kn})_{\max} = \max \left(\frac{1}{\sum_j \frac{1}{d_j^\lambda}} p_1^{kn}, \dots, \frac{1}{\sum_j \frac{1}{d_j^\lambda}} p_j^{kn}, \dots, \frac{1}{\sum_j \frac{1}{d_j^\lambda}} p_Z^{kn} \right) \quad (8)$$

加权和作为区间灰数的重心:

$$(p_j^{kn})_w = \frac{1}{\sum_j \frac{1}{d_j^\lambda}} p_1^{kn} + \dots + \frac{1}{\sum_j \frac{1}{d_j^\lambda}} p_j^{kn} + \dots + \frac{1}{\sum_j \frac{1}{d_j^\lambda}} p_Z^{kn} \quad (9)$$

2) 邻井数量较少时, 如只有 1 口井, 灰数三参数可借助地层信息的纵向特征进行统计分析, 确定分布区间。理论和实践证明, 同一时期沉积的地层具有相同或相近的地质、地震、测井等参数的响应区间, 这也是地层组划分对比的基础和依据。基于该思想, 将同组地层内相邻测点间的测井解释地质参数作为一组测量样本, 将此深度点的坍塌压力视为此深度点的均值, 确定每个测点处的地质参数灰色特征参数: 上限、下限以及重心。

假设通过邻井移植得到井深区间 $\Delta H = [H_o^{su}, H_o^{sl}]$ 内共有 $(2n+1)$ 个地层参数离散值 (图 4)。由于地层的空间连续性, 该参数在 ΔH 区间内具有相似性、连续性, 因此, 可将区间 ΔH 内的地层参数作为数据点 i 所处井深处地质参数的一个测量样本 $\{P_{(i-n)}, P_{(i-n+1)}, \dots, P_{(i+n)}\}$ 。

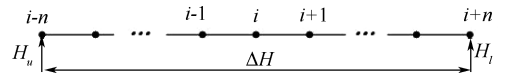


图 4 地层参数样本

Fig. 4 Sample diagram of formation parameters

考虑到地质参数空间变异性限制, 样本区间 ΔH 不宜过大, ΔH 可根据该地层组内的变异函数确定。假设待分析地层组内不同深度 $h_k, (k=1, 2, \dots, Z)$ 处的地质参数为 $p(h_k)$, 深度间隔为 Δh , 则变异函数为:

$$\gamma(\Delta h) = \frac{1}{2(Z-1)} \sum_{k=1}^Z [p(h_k) - p(h_k + \Delta h)]^2 \quad (10)$$

对不同的深度间隔 $[m\Delta h, \gamma(m\Delta h)], (m=1, 2, \dots, Z-1)$, 可计算相应的 $\gamma(m\Delta h)$, 然后利用变异函数 (式 10) 拟合离散点 $[m\Delta h, \gamma(m\Delta h)]$, 确定理论模型参数, 最后把 2 倍的变程作为样本区间 ΔH 。

样本区间确定后, 可以根据信息扩散理论得到 i 处地质参数的正态信息扩散概率密度函数:

$$f_i(p) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} (2n+1) \delta^{i-n}} \left\{ \exp \left[-\frac{(p-p_j)^2}{2\delta^2} \right] \right\} \quad (11)$$

式中: $\delta = C\sigma$, 为扩散系数; C 为窗宽, 通常为常数, 且 $C > 0$ 。

假设钻井地质参数 X 在区间 $\Delta H = [H_u, H_l]$ 内的最大值为 P_{\max} , 最小值为 P_{\min} , 扩散系数通过下式计算:

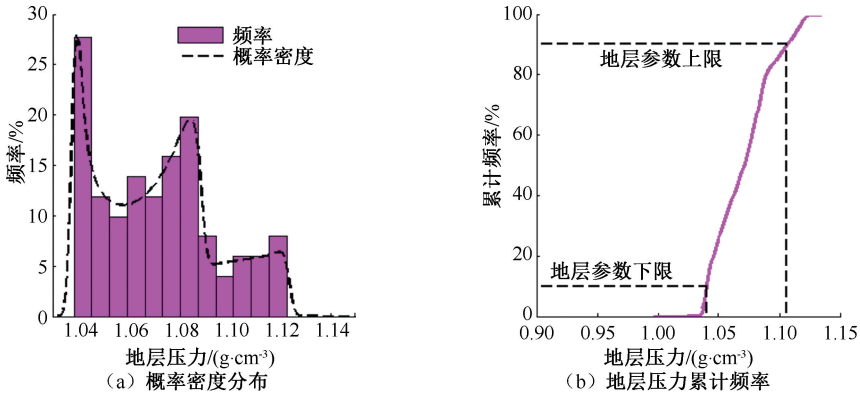
$$\delta = \frac{\eta(P_{\max} - P_{\min})}{2n} \quad (12)$$

式中 η 为系数, 由样本数 $2n$ 确定, 一般取 1.420 693。

考虑小概率事件不易发生的特性, 以一定可信度对累积概率函数进行插值处理 (图 5), 得到一定累积概率的地层参数上限和下限值, 并将上限值作为三参数地层灰数的上限 $(p_j^{kn})_{\max}$, 将下限值作为三参数地层灰数的下限 $(p_j^{kn})_{\min}$, 另外, 可以将邻井移植过来的值作为重心 $(p_j^{kn})_w$ 。

基于以上计算方法, 可以确定目标井的三参数区间灰数安全钻井液密度窗口。

$$M_{bo}^s = \left[\left(\frac{H_o^{su} - H_j^{sl} (H_o^{sl} - H_o^{su})}{H_j^{sl} - H_j^{su}} \right) \begin{matrix} 1 \\ \vdots \\ 1 \\ \vdots \\ 1 \end{matrix} \right] +$$



注:在钻井中,地层压力一般采用当量密度(等效密度)进行表征,所以压力以及各种系数的单位均为 g/cm^3 。

图5 含可信度地质参数矩阵构建

Fig. 5 Construction of geological parameter matrix with credibility

$$\frac{H_o^{ku} - H_o^{lu}}{H_j^{ku} - H_j^{lu}} \begin{bmatrix} h_j^{ku} \\ \vdots \\ h_j^{kn} \\ \vdots \\ h_j^{kl} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} (p_j^{ku})_{\min} & (p_j^{ku})_w & (p_j^{ku})_{\max} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ (p_j^{kn})_{\min} & (p_j^{kn})_w & (p_j^{kn})_{\max} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ (p_j^{kl})_{\min} & (p_j^{kl})_w & (p_j^{kl})_{\max} \end{bmatrix} \quad (13)$$

逐层求取目标井井筒矩阵后,将各个矩阵按照地质分层顺序组装,得到目标井全井的井筒信息矩阵,即灰色安全钻井液密度窗口。

$$M_{bo} = \begin{bmatrix} \left[\left(H_o^{(s-1)u} - \frac{H_j^{(s-1)u}(H_o^{(s-1)l} - H_o^{(s-1)u})}{H_j^{(s-1)l} - H_j^{(s-1)u}} \right) \begin{bmatrix} 1 \\ \vdots \\ 1 \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix} + \frac{H_o^{(s-1)l} - H_o^{(s-1)u}}{H_j^{(s-1)l} - H_j^{(s-1)u}} \begin{bmatrix} h_j^{ku} \\ \vdots \\ h_j^{kn} \\ \vdots \\ h_j^{kl} \end{bmatrix} \right] \begin{bmatrix} (p_j^{ku})_{\min} & (p_j^{ku})_w & (p_j^{ku})_{\max} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ (p_j^{kn})_{\min} & (p_j^{kn})_w & (p_j^{kn})_{\max} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ (p_j^{kl})_{\min} & (p_j^{kl})_w & (p_j^{kl})_{\max} \end{bmatrix} \\ \vdots \\ \left[\left(H_o^{su} - \frac{H_j^{su}(H_o^{sl} - H_o^{su})}{H_j^{sl} - H_j^{su}} \right) \begin{bmatrix} 1 \\ \vdots \\ 1 \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix} + \frac{H_o^{sl} - H_o^{su}}{H_j^{sl} - H_j^{su}} \begin{bmatrix} h_j^{ku} \\ \vdots \\ h_j^{kn} \\ \vdots \\ h_j^{kl} \end{bmatrix} \right] \begin{bmatrix} (p_j^{ku})_{\min} & (p_j^{ku})_w & (p_j^{ku})_{\max} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ (p_j^{kn})_{\min} & (p_j^{kn})_w & (p_j^{kn})_{\max} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ (p_j^{kl})_{\min} & (p_j^{kl})_w & (p_j^{kl})_{\max} \end{bmatrix} \\ \vdots \\ \left[\left(H_o^{(s+1)u} - \frac{H_j^{(s+1)u}(H_o^{(s+1)l} - H_o^{(s+1)u})}{H_j^{(s+1)l} - H_j^{(s+1)u}} \right) \begin{bmatrix} 1 \\ \vdots \\ 1 \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix} + \frac{H_o^{(s+1)l} - H_o^{(s+1)u}}{H_j^{(s+1)l} - H_j^{(s+1)u}} \begin{bmatrix} h_j^{ku} \\ \vdots \\ h_j^{kn} \\ \vdots \\ h_j^{kl} \end{bmatrix} \right] \begin{bmatrix} (p_j^{ku})_{\min} & (p_j^{ku})_w & (p_j^{ku})_{\max} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ (p_j^{kn})_{\min} & (p_j^{kn})_w & (p_j^{kn})_{\max} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ (p_j^{kl})_{\min} & (p_j^{kl})_w & (p_j^{kl})_{\max} \end{bmatrix} \\ \vdots \end{bmatrix} \quad (14)$$

3 基于灰数的钻井风险评价方法

钻井液密度与安全钻井液密度窗口间的关系不匹配是导致溢流、井漏^[12]、井塌^[13]、卡钻^[14]等钻井风险的根本原因,通过分析钻井液密度与安全钻井液密度窗口之间的关系,可以了解钻井风险情况。由于安全钻井液密度窗口是由安全上限和安全下限组成

钻井是一项隐蔽的地下工程,井眼打开后入井的

的,因此,分2种情况讨论对应的钻井风险。

1) 钻井液密度小于安全钻井液密度窗口的下限时发生钻井风险,如溢流、井壁坍塌等。以溢流风险为例,假设地层孔隙压力为三参数区间灰数,上限和下限表示地层孔隙压力的取值范围,重心表示地层孔隙压力最可能取的值。在钻井液密度右侧,由于钻井液密度小于地层孔隙压力,地层流体容易侵入井筒发生溢流风险,对应的区域为溢流风险域;在钻井液密度左侧,由于钻井液密度大于地层孔隙压力,地层流体被压制侵入井筒,为不容易发生溢流的安全险域,如图6所示。

根据广义强度—干涉理论,由图6可知:溢流风

$$P = P(\rho_d gh \leq F_p) = \frac{S_{ri}}{S_{sa} + S_{ri}}$$

$$\begin{cases} 0 & (F_{p_2} \leq \rho_d gh) \\ \left[\frac{w_2 - w_1}{F_{p_0} - F_{p_2}} (\rho_d gh - F_{p_0}) + w_2 + w_1 \right] (F_{p_2} - \rho_d gh) \\ \frac{(w_1 + w_2)(F_{p_2} - F_{p_1})}{(w_1 + w_2)(F_{p_2} - F_{p_1})} \times 100\% & (F_{p_0} \leq \rho_d gh \leq F_{p_2}) \\ \left\{ \frac{F_{p_2} - F_{p_0}}{F_{p_2} - F_{p_1}} + \left[\frac{w_2 - w_1}{F_{p_0} - F_{p_1}} (\rho_d gh - F_{p_0}) + w_2 + w_2 \right] (F_{p_0} - \rho_d gh) \right\} \times 100\% & (F_{p_1} \leq \rho_d gh \leq F_{p_0}) \\ 100 & (\rho_d gh \leq F_{p_1}) \end{cases} \quad (15)$$

2) 钻井液密度大于安全钻井液密度窗口的上限时发生钻井风险,如井漏、压差卡钻等。以井漏风险为例,假设地层破裂压力为三参数区间灰数,上限和下限表示地层破裂压力的取值范围,重心表示地层破裂压力最可能取的值。在钻井液密度右侧,由于钻井液密度小于地层破裂压力,为不容易发生井漏的安全险域;在钻井液密度左侧,由于钻井液密度大于地层破裂压力,为容易发生井漏的风险域,如图7所示。

同样,井漏风险发生的可能性为风险域面积 S_{ri} 的占比,井漏风险概率计算模型如下:

$$P = P(\rho_d gh \geq F_f) = \frac{S_{ri}}{S_{sa} + S_{ri}}$$

$$\begin{cases} 0 & (\rho_d gh \leq F_{f_1}) \\ \left[\frac{w_2 - w_1}{F_{f_0} - F_{f_2}} (\rho_d gh - F_{f_0}) + w_2 + w_1 \right] (F_{f_2} - \rho_d gh) \\ \frac{(w_1 + w_2)(F_{f_2} - F_{f_1})}{(w_1 + w_2)(F_{f_2} - F_{f_1})} \times 100\% & (F_{f_1} \leq \rho_d gh \leq F_{f_0}) \\ \left\{ \frac{F_{f_0} - F_{f_1}}{F_{f_2} - F_{f_1}} + \left[\frac{w_2 - w_1}{F_{f_0} - F_{f_2}} (\rho_d gh - F_{f_0}) + w_2 + w_2 \right] (\rho_d gh - F_{f_0}) \right\} \times 100\% & (F_{f_0} \leq \rho_d gh \leq F_{f_2}) \\ 100 & (F_{f_2} \leq \rho_d gh) \end{cases} \quad (16)$$

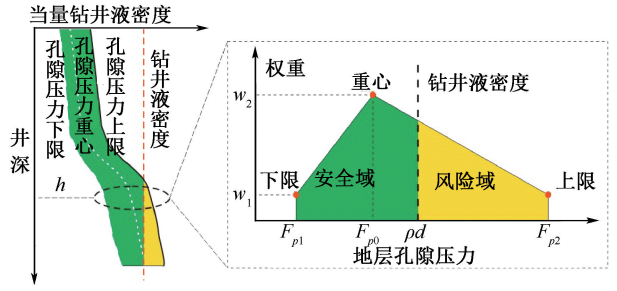


图6 溢流风险概率计算

Fig. 6 Overflow risk probability calculation

险发生的可能性为风险域面积 S_{ri} 的占比,溢流风险概率计算模型如下:

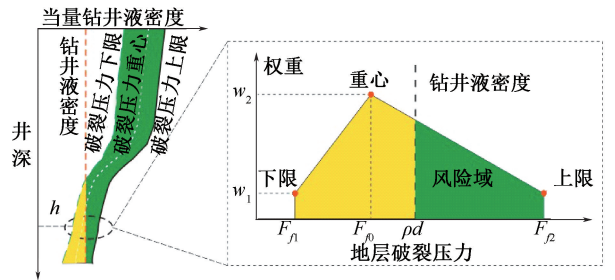


图7 井漏风险概率计算

Fig. 7 Well leakage probability risk calculation

基于以上提出的风险评价方法,开发了配套评价程序,评价流程如图8所示。

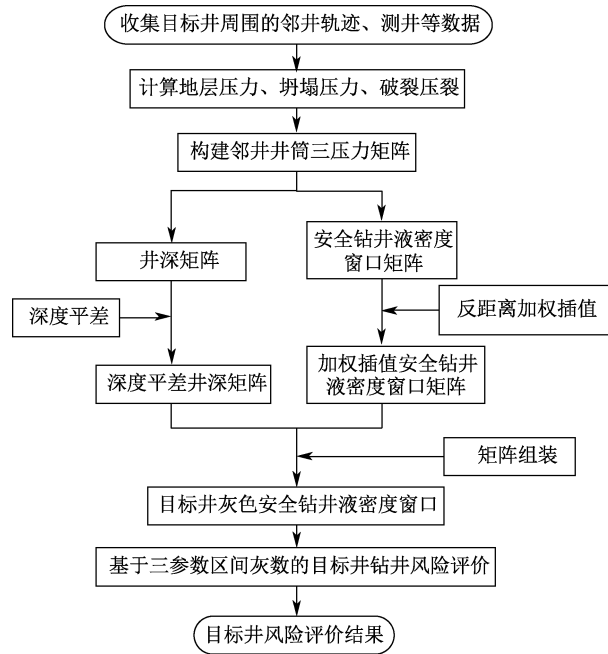


图8 基于邻井信息的钻井风险评价流程

Fig. 8 Drilling risk assessment process based on grey information of adjacent wells

4 钻井风险评价工程实例分析

中国西部某油田的某个构造区域内有一口重点开发井 WO,井型为直井,完钻井深为 6 130 m,查阅井史发现,由于钻井液密度与安全钻井液密度窗口不匹配,该井施工过程中共发生 8 次钻井风险,具体情况见表 2。

为验证邻井信息对目标井钻井风险评价的影响

表 2 目标井实际风险与风险评价结果对比

Table 2 Comparison of target well's risk between real situation and risk analysis

井深/m	钻井风险类型	风险概率/%
609	井漏	15.5
3 537	溢流	74.5
3 868	井漏	75.5
4 087	吸附卡	76.5
4 289	井漏	79.5
4 639	井漏	81
4 808	井漏	62
5 758	吸附卡	42.5

选取与 WO 井同一构造区域内的 WA、WB、WC、WD4 口邻井为数据来源,评价 WO 井的钻井风险。另外,为验证邻井信息移植的可行性,通过 4 口邻井在 M 地层的地质压力估算目标井的地质压力进。目标井和邻井的井位部署与 M 地层的顶界、底界分布情况见表 3。

表 3 M 地层顶届和底界井深参数

Table 3 Top and bottom well depth parameters of M formation

井名	M formation			
	X	Y	M 地层顶界	M 地层底界
目标井 WO	3 120	4 273	3 750	3 895
邻井 WA	3 750	4 350	4 350	4 209
邻井 WB	3 895	4 209	3 716	4 684
邻井 WC	3 716	4 684	3 522	4 750
邻井 WD	3 522	4 750	3 119	4 273

对邻井的地层压力矩阵(图 9a)进行深度平差处理(图 9b),根据反距离加权插值,按照三参数区间灰数的确定方法计算得到地层压力的三参数区间灰数(图 9c),并与目标井测井解释得到的地层压力

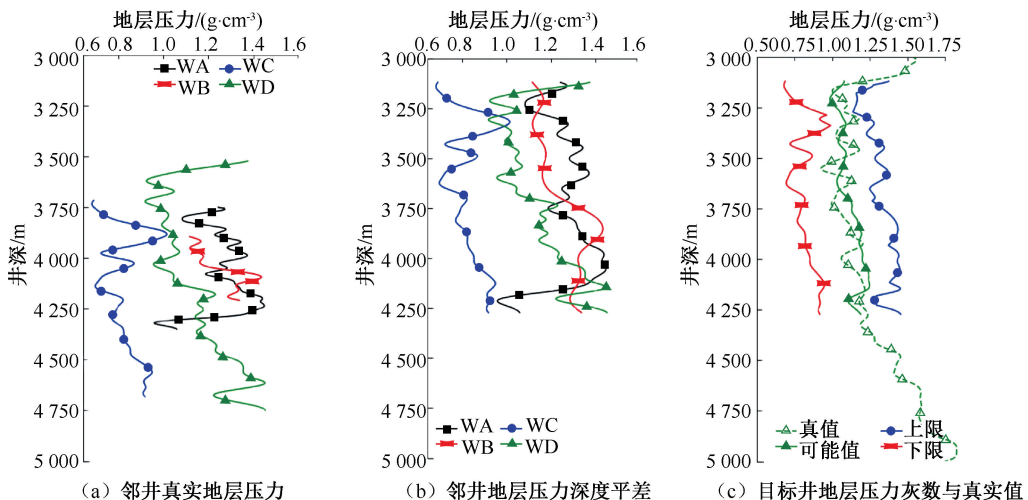


图9 深度平差处理

Fig. 9 Depth adjustment processing

对比,如图9所示。

从图9看出,基于邻井信息确定的地层参数的三参数区间灰数能够将地层压力真值涵盖在内。对所有地层进行同样处理可得到基于邻井信息的目标井灰色地层孔隙压力、地层坍塌压力和地层破裂压力,通过分析区间灰数内的风险特征,最大可能了解井筒对应的风险。

地层孔隙压力、地层坍塌压力及地层破裂压力属于安全钻井液密度窗口的客观地质因素,此外,还应考虑主观的工程因素,即井身结构设计系数,由于设计系数为区域经验值,很难给出一个精确的具体值,具有一定灰色模糊性,因此,假设设计系数为区间灰数,根据研究区域的特征,各设计系数的取值见表4。

基于以上基础数据,利用文中建立的三参数区

表4 设计系数的区间灰数

Table 4 Interval grey number of design coefficient

设计系数	下限	上限
$S_b / (g \cdot cm^{-3})$	0.024	0.048
$S_g / (g \cdot cm^{-3})$	0.024	0.048
$S_f / (g \cdot cm^{-3})$	0.03	0.06
$S_c / (g \cdot cm^{-3})$	0.01	0.05
$S_k / (g \cdot cm^{-3})$	0.05	0.08
$\Delta\rho / (g \cdot cm^{-3})$	0.01	0.015
$\Delta F / MPa$	12	15

间灰数条件下的钻井风险评价模型,得到目标井井筒风险矩阵,其结果如图10和表2所示,可以看出,风险评价结果与现场钻井风险吻合较好,表明文中所建立的基于邻井信息的钻井风险评价方法是可行的。

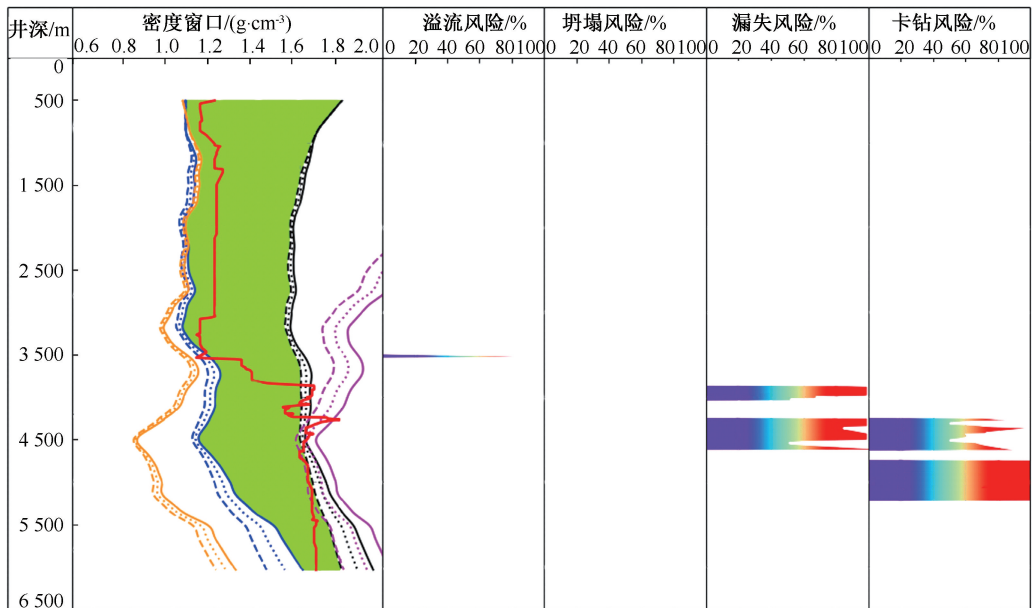


图10 目标井钻井风险评价结果

Fig. 10 Target well drilling risk assessment results

5 结论

1) 引入井筒信息矩阵概念,通过深度平差和加权插值,可简化参数的描述和计算,有效地将邻井信息移植到目标井,未来可进一步考虑邻井信息在地质信息剖面方面的应用。

2) 受客观地质条件的复杂性影响,利用已钻邻井资料预测同一区域的目标井安全钻井液密度窗口

存在较大不确定性,基于三参数区间灰数和井筒信息矩阵建立的灰色安全钻井液密度窗口可避免这种不确定性。

3) 考虑钻井液密度与灰色安全钻井液密度窗口不匹配导致钻井风险的力学致险机制,根据广义强度—干涉理论建立钻井风险评价模型,其评价结果与实际工况吻合,可作为一种钻井评价方法应用于钻工风险评价中。

参考文献

[1] PENG Chi, LI Qingfeng, FU Jianhong, et al. Risk assessment method for bullheading killing based on the uncertainty of

- formation parameters [J]. *Lithosphere*, 2022, 2022(12): DOI:10. 2113/2022/7112036.
- [2] ESMERSON C, KANIA A, KASHIKAR S, et al. Optimum use of seismic data to reduce drilling risk and improve well placement[C]. 73rd EAGE Conference and Exhibition incorporating SPE EUROPEC 2011. European Association of Geoscientists & Engineers, 2011, (5): 23–26.
- [3] AHMED S, KHAN K, OMINI P, et al. An integrated drilling and geomechanics approach helps to successfully drill wells along the minimum horizontal stress direction in khuff reservoirs[C]. Abu Dhabi International Petroleum Exhibition and Conference, 2014: DOI:10. 2118/171755-MS.
- [4] WEI Kai, LI Qiandeng, LUAN Jiacui, et al. Formation matrix and its application in drilling risk evaluation [J]. *International Journal of Safety and Security Engineering*, 2020, 10(3): 351–357.
- [5] GUAN Zhichuan, WEI Kai, FU Shenglin, et al. Risk evaluation method for drilling engineering based on interval analysis[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2015, 41(4): 15–18.
- [6] MONDAL S, CHATTERJEE R. Quantitative risk assessment for optimum mud weight window design: a case study[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2019, 176: 800–810.
- [7] LIU Sifeng, FANG Zhigen, YANG Yingjie, et al. General grey numbers and their operations[J]. *Grey Systems: Theory and Application*, 2012, 2(3): 341–349.
- [8] 魏凯,管志川,马金山,等. 钻井地质参数的不确定性表征及分析方法[J]. *中国石油大学学报:自然科学版*, 2015, 39(5):89–93.
- WEI Kai, GUAN Zhichuan, MA Jinshan, et al. Assessment method for uncertainty of geological parameters in well drilling[J]. *Journal of China University of Petroleum; Edition of Natural Science*, 2015, 39(5): 89–93.
- [9] 胜亚楠,管志川,罗鸣,等. 基于不确定性分析的钻井工程风险定量评价方法[J]. *中国石油大学学报:自然科学版*, 2019, 43(2): 91–96.
- SHENG Ya'nan, GUAN Zhichuan, LUO Ming, et al. A quantitative evaluation method of drilling risks based on uncertainty analysis theory [J]. *Journal of China University of Petroleum; Edition of Natural Science*, 2019, 43 (2): 91–96.
- [10] 朱伟,顾韶秋. 湘中煤层气开发可行性与施钻风险分析[J]. *中国安全科学学报*, 2010, 20(5): 97–101.
- ZHU Wei, GU Shaoqi. Coal bed gas development feasibility & drilling risk analysis in central hunan [J]. *China Safety Science Journal*, 2010, 20(5): 97–101.
- [11] GUO Jiateng, WANG Xulei, WANG Jiangmei, et al. Three dimensional geological modeling and spatial analysis from geotechnical borehole data using an implicit surface and marching tetrahedra algorithm[J]. *Engineering Geology*, 2021: DOI: 10. 1016/j. enggeo. 2021:106047.
- [12] 袁智,汪海阁,王海强,等. 基于事故树分析的钻井井漏事故危险评价研究[J]. *中国安全科学学报*, 2010, 20(3): 107–112.
- YUAN Zhi, WANG Haige, WANG Haiqiang, et al. Application of fault tree analysis to risk assessment of lost circulation hazards in drilling[J]. *China Safety Science Journal*, 2010, 20(3): 107–112.
- [13] 赵春兰,殷慧敏,王兵,等. 基于结构方程与蒙特卡洛方法的钻井现场作业风险评价[J]. *天然气工业*, 2019, 39(2): 84–93.
- ZHAO Chunlan, YIN Huimin, WANG Bing, et al. Risk assessment of drilling site operation based on the structural equation and Monte Carlo method[J]. *Natural Gas Industry*, 2019, 39(2): 84–93.
- [14] 魏凯,管志川,韦杰宏,等. 基于神经网络和 Monte-Carlo 模拟的钻井工程风险评估方法[J]. *中国安全科学学报*, 2013, 23(2): 123–128.
- WEI Kai, GUAN Zhichuan, WEI Jiehong, et al. Drilling engineering risk evaluation method based on neural network and monte-carlo simulation[J]. *China Safety Science Journal*, 2013, 23(2): 123–128.

作者简介: 魏凯 (1983—),男,山东新泰人,博士,副教授,主要从事储层改造动力学、新能源开发与储备、智能钻井风险监控等方面的教学和研究工作。E-mail: weikai630@163.com。

