引用格式:高晨阳,赵福海,高莲凤,等,2023.基于构造应变分析的裂缝预测方法及其应用[J].地质力学学报,29(1):21-33.DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2022089

Citation: GAO C Y, ZHAO F H, GAO L F, et al., 2023. The methods of fracture prediction based on structural strain analysis and its application [J]. Journal of Geomechanics, 29 (1): 21–33. DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2022089

基于构造应变分析的裂缝预测方法及其应用

高晨阳¹,赵福海²,高莲凤¹,李丙喜³,雷茂盛³,丁 恺¹ GAO Chenyang¹, ZHAO Fuhai², GAO Lianfeng¹, LI Bingxi³, LEI Maosheng³, DING Kai¹

1. 辽宁工程技术大学矿业学院, 辽宁 阜新 123000;

- 2. 大庆油田有限责任公司勘探事业部,黑龙江大庆 163453;
- 3. 北京天元云开科技有限公司,北京 100085
- 1. Mining College, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, Liaoning, China;
- 2. Exploration Enterprise Department of Daqing Oilfield Co. Ltd., Daqing 163453, Heilongjiang, China;

3. Beijing Tianyuanyunkai Technology Co. Ltd., Beijing 100085, China

The methods of fracture prediction based on structural strain analysis and its application

Abstract: Formation strain can directly affect the generation of structural fractures. According to the magnitude of structural strain, the location and intensity of structural fracture development can be predicted, and the chief fracture development areas in the study area can be divided. This paper takes the fourth member of the Yingcheng formation (referred to as the YING-4 section) in the Xuzhong area of the Xujiaweizi rift in the Songliao basin as the research object. Based on establishing a detailed 3D structural model of the study area, we used the "structural restoration" method to restore the paleo-structure of the study area and calculated finite strain values to predict the planar distribution of structural fractures. The research shows that the YING-4 section in the study area mainly includes three fracture-making periods, namely the end of the Yingcheng formation, the Quantou–to–Qingshankou formation, and the Nenjiang formation. Among them, the tectonic deformation at the end of the Yingcheng formation and the Quantou–to–Qingshankou formation. Type I fracture development zones according to the relationship between strain size and test gas production. Type I fracture development zone can be used as an important direction for the next step of deep natural gas exploration. Type II fracture development zone has low productivity, and the fractures have limited effect on reservoir reconstruction. Keywords: fracture prediction; structural strain; paleo-structural restoration; Xujiaweizi rift; Songliao basin

摘 要:地层应变是构造裂缝产生的直接因素,根据构造应变大小可以预测构造裂缝发育的位置和强度,对研究区的主要裂缝发育区进行划分。文章以松辽盆地徐家围子断陷徐中地区营城组四段(简称营四段)为研究对象,在建立研究区精细的三维构造模型基础上,利用"构造恢复"方法实现研究区古构造恢复,通过开展有限应变值计算来预测构造裂缝的平面分布。研究表明:研究区营四段主要包括3个造缝期,即营城组末期、泉头组一青山口组时期、嫩江组时期,其中,营城组末期与泉头组一青山口组时

基金项目:中国石油天然气集团公司前瞻性基础性研究项目(2021DJ0205);辽宁工程技术大学学科创新团队资助项目(LNTU20TD-14) This research is financially supported by the Forward-looking Basic Research Project of the China National Petroleum Corporation (Grant 2021DJ0205) and the Project of the Discipline Innovation Team of the Liaoning Technology University (Grant LNTU20TD-14).

第一作者: 高晨阳(1996-), 男, 在读硕士, 从事沉积地质与矿产研究。E-mail: 523178632@qq.com

通讯作者:高莲凤(1970一),女,博士,教授,主要从事沉积地质、储层评价与矿产资源开发方面的教学与科研工作。E-mail: ytgaolf@163.com 收稿日期: 2022-07-13;修回日期: 2023-01-03;责任编辑:范二平

期的构造变形较为强烈,是裂缝的主要形成时期。根据应变大小与试气产量的关系,将研究区划分为 3类裂缝发育区,Ⅰ类裂缝发育区已钻井验证,表明利用构造应变对裂缝的预测结果可靠,Ⅱ类裂缝发育 区可作为深层天然气的下一步挖潜的重要方向,Ⅲ类裂缝发育区产能较低,裂缝对储层的改造作用有限。 关键词:裂缝预测;构造应变;古构造恢复;徐家围子断陷;松辽盆地

中图分类号: P618.13; TE19 文献标识码: A 文章编号: 1006-6616 (2023) 01-0021-13 DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2022089

0 引言

致密砂砾岩储层广泛发育,在油气成藏时期, 天然裂缝为储层提供了必要的渗流通道和储集空 间(吕文雅等, 2020), 准确预测裂缝的发育情况是 高效开发此类天然气藏的关键。目前,国内外学者 主要通过地质方法、数值模拟方法以及地球物理方 法预测裂缝分布(Fisk et al., 2010; Zeng et al., 2013b; Duriez et al., 2016; Marrett et al., 2018; Gong et al., 2019; Ozkaya, 2019; Jiang et al., 2022)。地质方法包 括地质类比法、地层曲率法以及基于构造应变的地 质成因法等。程光瑛等(1988)基于邻区裂缝分布信 息,总结了影响裂缝发育强度的主要地质因素,采 用类比法对川南地区茅口组进行裂缝预测,但类比 法要求构造背景近似且误差较大;地层曲率法从现 今曲率大小出发预测裂缝的发育程度和分布,但目 的层沉积后,会接受多期构造活动改造产生裂缝, 现今地层由于构造改造的叠加作用可能会回归平 缓导致地层曲率消失,而构造变形产生的裂缝并不 会消失,因此,曲率法无法有效预测地质演化过程 中裂缝可能分布的位置(任浩林等, 2020), 且以曲 率预测裂缝发育强度会受到层厚因素的影响 (Borković et al., 2018)。数值模拟多采用有限元方法 对古今应力场进行数值模拟,计算地层的应力分布 结合岩石破裂准则预测裂缝分布,但这种基于应力 场的数值模拟方法需要复杂的边界条件和合理的 力学参数,同时无法完全重建漫长构造演化史中的 各类地质事件(Laubach et al., 2014; Xie et al., 2019; 张 继标等,2019)。地球物理方法利用地震波的各向 异性及地震属性可以分尺度对裂缝进行预测,但以 该方法预测裂缝要求高分辨率的地震数据,且采集 过程和处理过程复杂不能确保可靠性(Cho et al., 2018; Xiao et al., 2018; 刘俊州等, 2021)。

松辽盆地徐家围子断陷徐中地区营城组四段储 层以致密砂砾岩为主,整体物性差,在天然裂缝改 造后形成了良好的气藏储层。然而,针对研究区天 然裂缝发育特征与分布预测的相关研究较为薄弱, 已有研究仅是提出该区构造裂缝发育且分布非均 质性强,指出构造裂缝的发育特征与其形成时期的 构造运动有关(文慧俭等,2008),没有深入开展构 造裂缝的分布预测研究。尽管研究区埋藏深、构造 复杂、层速度高导致地震资料分辨率低,基于地震 资料预测裂缝分布难度较大,但地震资料的精度足 以进行构造解释,在得到构造模型的基础上进行构 造反演恢复原始构造模型,再将原始构造模型正演 到现今状态,以正演变形过程中的应变量预测裂缝 的分布。此次研究在利用应变大小预测裂缝发育 强度的基础上,剖析了研究区不同期次的构造活 动,确定了主要造缝期,由老到新逐期对地层应变 大小进行计算,通过不同阶段的应变量,分期次预 测了构造活动所形成裂缝的区域和强度,提高了裂 缝预测的精度,指明了裂缝潜在的发育位置。

1 古构造恢复方法及有限应变计算原理

恢复古构造古地貌最简单的方法就是印模法, 但其存在一定的局限性,比如在断层和褶皱发育的 地区存在假厚度,从而引起恢复古地貌后的假构 造。"构造恢复"方法可以很好地避免出现上述问 题(马如辉和王安志,2006),通过对地层的沉积进 行反演(反演恢复过程中地层的面积和体积保持守 恒),可得到不同时期的古地貌图。"构造恢复"法 的主要工作为"去断层恢复"和"去褶皱恢复",结 合研究区主要发育正断层以及相关褶皱的特点,在 地层正反演的过程中主要使用了斜剪切和弯滑去 褶皱两种算法。

斜剪切算法主要源于 Gibbs(1983)和 Withjack and Peterson(1993)的理论,通过模拟断层上盘变形, 使上盘地层在三维空间中根据实际的断距沿钉线 运动,反演伸展断层的形成过程消除断距,此过程 中仅上盘发生形变,且体积不变(图 1a);弯滑去褶 皱算法可以消除褶皱对研究区地层的影响,该算法



a一斜剪切法恢复断层示意图(①一伸展断层形成前;②一伸展断层形成过程);b一弯滑去褶皱法恢复褶皱示意图(①一现今地层形态; ②一弯滑去褶皱恢复后地层形态)

图1 构造恢复方法示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the structural restoration methods

(a) Schematic diagram of the fault restoration by the oblique shear method (①–Before the extensional fault formation; ②–Formation process of the extensional fault); (b) Schematic diagram of the fold restoration by the flexural slip unfolding method (①–Current stratigraphic morphology; ②–Stratigraphic morphology after the fold restoration)

将模板地层和目标地层作为整体进行恢复,其原理 是将地层整体作为滑动系统,将地层平行均分为 n份一定厚度的滑动层,拉平模板地层时以厚度为 标准,控制以下的滑动层变形,在变形恢复过程中, 地层沿钉面的位置不变,向钉面的垂直方向展开, 此过程模板层的面积保持不变(图 1b)。

在数学上, 位移梯度定义为两个粒子之间的位 移相对于它们位置变化的变化(刘序俨等, 2011)。 如果地层的位移梯度为零, 即岩体上位移矢量的大 小和方向均相同, 变形方式为平移; 当某些点相对 于其他点有移动时, 则岩体发生扭曲, 产生应变, 即 非零位移梯度会导致应变。在一维坐标空间中位 移梯度对于一个拉伸杆的定义就是伸长率, 即变形 长度与原始长度的比值(Means, 1976), 构造应变计 算过程如公式(1)-(4)所示:

$$u_A = x_A - X_A \tag{1}$$

$$u_B = x_B - X_B \tag{2}$$

$$\Delta u = u_B - u_A \tag{3}$$

$$E = \frac{\Delta u}{\Delta x} \tag{4}$$

公式中, X_A 、 X_B 与 x_A 、 x_B 分别为A、B两点位移前 和位移后在一维空间下的坐标; u_A 、 u_B 为A、B两点 的位移量; Δu 为A、B两点位移之间的相对差; Δx 为 拉伸杆的原始长度; E为一维空间下的位移梯度。

在二维坐标空间中,位移梯度由一维空间中的 $\Delta u/\Delta x$ 变为二阶位移梯度矩阵 G_{ij} ,需要计算拉伸杆 两个顶点的位移梯度,进而计算有限应变(Means, 1976),计算公式如(5)—(8)所示:

$$u_{iA} = x_{iA} - X_{iA} \tag{5}$$

$$u_{iB} = x_{iB} - X_{iB} \tag{6}$$

$$\boldsymbol{G}_{ij} = \frac{\Delta u_i}{\Delta x} = \frac{u_{iB} - u_{iA}}{\Delta x} \tag{7}$$

$$\boldsymbol{E}_{ij} = \frac{1}{2} \left(\boldsymbol{G}_{ij} + \boldsymbol{G}_{ji} + \boldsymbol{G}_{ki} \times \boldsymbol{G}_{kj} \right)$$
(8)

公式中, X_{iA} 、 X_{iB} 及 x_{iA} 、 x_{iB} 分别为两个顶点的形 变前及形变后的位置坐标; Δx 为拉伸杆的原始长 度; G_{ij} 为位移梯度矩阵; u_{iA} 、 u_{iB} 为A、B两个顶点在 x或y方向上的位移量; Δu_i 为A、B两点位移之间的 相对差; E_{ij} 为有限应变; k代表要添加k个附加项, 值由 1 到求解空间的维度 k_o

如计算超过 2 个点形变的应变量,则需建立一 个线性方程组求解位移梯度矩阵,位移梯度矩阵包 含平移向量 (t_1, t_2) 的分量和位移梯度矩阵的分量 G_{ij} (Cardozo and Allmendinger, 2009),计算公式如(9)— (12)所示:

$$u_i = t_i + \boldsymbol{G}_{ij} \times \boldsymbol{X}_j \tag{9}$$

$$\boldsymbol{b} = \boldsymbol{M} \times \boldsymbol{a} \Rightarrow \begin{bmatrix} u_{1A} \\ u_{2A} \\ u_{1B} \\ u_{2B} \\ \vdots \\ \vdots \\ u_{1N} \\ u_{2N} \end{bmatrix}$$
$$= \begin{bmatrix} 1 & 0 & X_{1A} & X_{2A} & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & X_{1A} & X_{2A} \\ 1 & 0 & X_{1B} & X_{2B} & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & X_{1B} & X_{2B} \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ 1 & 0 & X_{1N} & X_{2N} & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & X_{1N} & X_{2N} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} t_1 \\ t_2 \\ G_{11} \\ G_{22} \\ G_{21} \\ G_{22} \\ G_{21} \\ G_{22} \end{bmatrix}$$
(10)

$$\boldsymbol{a} = \boldsymbol{M}^{-1} \times \boldsymbol{b} \tag{11}$$

$$\boldsymbol{E}_{ij} = \frac{1}{2} \left(\boldsymbol{G}_{ij} + \boldsymbol{G}_{ji} + \boldsymbol{G}_{ki} \times \boldsymbol{G}_{kj} \right)$$
(12)

公式中, *u*_i为位移向量; *t*_i为平移向量在 *x* 或 *y* 方向上的分量; *X*_j为包含单个顶点位移前位置信息的矩阵; *b*为位移矩阵; *M*为顶点位置矩阵; *a*为位移梯度矩阵; *E*_{ii}为有限应变。

上述二维空间中n个顶点应变描述方法同样适 用于三维空间中的n个顶点,只是设计矩阵的大小 以及位移向量和解向量的长度会发生变化。计算 三维地层变形产生的有限应变需要通过构造恢复 法将现今构造模型反演到原始构造模型,使用有限 元法将地层离散成有限个连续单元,在单元交点放 置"应变捕获体",捕获构造模型正演变形过程中该 点周围的位移向量,统计各个单元的顶点位置以及 位移向量,构建并求解包含位移梯度矩阵解向量的 线性方程组,进而计算每个单元内的有限应变 大小。

2 应用实例

2.1 地质背景

徐家围子断陷位于松辽盆地北部,近南北向展 布,南北向长 120 km,中部最宽处约 55 km,构造面 积约 5300 km²,徐西断裂和宋西断裂控制了徐家围 子断陷的形成、发展和消亡(张元高等, 2010),早白 垩世晚期断陷开始向坳陷转化。研究区位于徐家 围子断陷中部的徐西凹陷(图 2a),西临中央古隆 起,东接徐东坳陷,处于徐西和徐中两大断裂的控 制之中。研究区早白垩世营城组与上下地层均呈 角度不整合接触(图 2b),自下而上发育四个亚段, 其中研究区营二段和营三段缺失,营一段火山岩和 营四段沉积岩直接接触,营四段是此次研究的目的 层段,以辫状河三角洲沉积及扇三角洲沉积为主, 下部发育一套暗色泥岩,上部东区以大套厚层砂砾 岩为主发育泥质隔层,西区逐渐转变为砂泥岩互



a一研究区构造位置图(据刘国平等, 2016 修改); b一研究区地层沉积序列图

图 2 研究区构造位置及地层沉积序列图

Fig. 2 Structural location and stratigraphic sedimentary sequence map of the study area

(a) Tectonic location map of the study area (modified from Liu et al., 2016); (b) Stratigraphic sedimentary sequence map of the study area

层,砂砾岩呈片状分布。研究区营四段地层压力大 小在 36.87~38.48 MPa,压力系数处于 1.076~1.102, 属于正常压力系统(冯子辉等, 2013)。

2.2 裂缝特征与主要造缝期

岩心观察表明,研究区营四段砂砾岩储层主要 发育构造裂缝,成岩裂缝次之,未见由溶蚀作用、风 化作用等非构造因素形成的次生裂缝,构造裂缝只 在局部地区发育。构造裂缝中可见剪切裂缝较为 发育,此类裂缝岩心上表现为缝面光滑,具有明显 的方向性(图 3a),张性裂缝发育较少,且多被充 填。多期构造作用形成的砾内缝、砾间缝和穿砾缝 普遍发育,充填物较常见,主要为方解石和泥质(图 3b、 3c)。依据 FMI(微电阻率扫描成像)测井裂缝识别 与岩心观察统计分析,研究区构造裂缝倾角集中分 布在 50°~90°(图 4a),主要发育有 4 组构造剪切裂 缝,分别为北东向、近南北向、北北东向和近东西 向(图 4b)。此外,不同区域的裂缝优势组系具有明显的差异性。例如,x3井构造裂缝主要发育方向为 北东向、近南北向和近东西向;x4井构造裂缝主要 发育方向为北北东向和近东西向;x8井构造裂缝主 要发育方向为近南北向和北北东向。3口井的裂缝 走向优势方位明显不同,表明研究区内主要发育受 断层和褶皱控制的局部构造裂缝。充填裂缝的走 向主要为北北东向、近南北向及北东向(图 4c)。总 体上,裂缝的充填率不足 15%,表明多数裂缝为有 效裂缝,有效裂缝的走向以近南北向、北东向和近 东西向为主。

研究区自早白垩世以来,在不同时间和区域上 受到多期构造运动的影响,导致区内营四段构造裂 缝发育复杂,裂缝形成期次划分主要可通过充填特 征、交切关系及对构造演化分析等手段实现(丘元 禧,2000; Zeng et al., 2013a; 王兆生等, 2020)。从裂



a一高角度构造裂缝, XS601 井, 3646.60 m; b-3 组构造裂缝, 早期构造裂缝被方解石完全充填, XS5 井, 3480.10 m; c-多组构造裂缝, 构造裂 缝(Ⅱ)发育受到构造裂缝(Ⅰ)限制, 构造裂缝(Ⅰ)又被构造裂缝(Ⅲ)切割, 部分裂缝被泥质完全充填, XS5 井, 3488.30 m

图 3 研究区构造裂缝照片

Fig. 3 Photos of structural fractures in the study area

(a) High-angle structural fractures (Well XS601 at 3646.60 m); (b) Three groups of structural fractures, and the early structural fractures are filled by calcite (Well XS5 at 3480.10 m); (c) Multiple groups of structural fractures; Structural fracture (I) limits the development of Structural fracture (II), and Structural fracture (\mathbb{II}) cut Structural fracture (I); Some of the fractures are filled by mud (Well XS5 at 3488.30 m)



a一构造裂缝倾向倾角等密图(n=242);b一构造裂缝走向玫瑰花图(n=242);c一充填裂缝走向玫瑰花图(n=35)

图 4 研究区裂缝产状分布图

Fig. 4 Distribution map of fracture occurrence in the study area

(a) Isometric map of the dip and dip direction of structural fractures (n=242); (b) Rose diagram of the strike of structural fractures (n=242); (c) Rose diagram of the strike of filling fractures (n=35)

缝发育段的岩心可以观察到多组构造裂缝的限制 和交切关系(图 3c),构造裂缝(Ⅰ)、(Ⅱ)均被充填, 说明充填作用发生前就已形成2期构造裂缝,两者 形成时间早于构造裂缝(Ⅲ),同时构造裂缝(Ⅰ)上 部限制构造裂缝(Ⅱ)的发育,下部被构造裂缝(Ⅲ) 切割,证明研究区至少发育3期构造裂缝。研究区 的剖面伸展率和断层活动速率(胡明等, 2010; 付晓 飞等, 2010) 指明营城组时期、泉头组一青山口组时 期及嫩江组时期发生的构造活动强度最大,同时这 3个时期均为研究区重要的不整合面(图 2b),对 3期构造应力场分析,发现裂缝优势走向与应力场 方向相配套,认为研究区构造裂缝主要发育在营城 组时期、泉头组一青山口组时期及嫩江组时期,与 巩磊等(2017)的观点认识一致。以3个造缝期为依 据,逐期对该区构造进行恢复计算地层的有限应变 大小。

2.3 徐家围子营四段构造恢复

构造恢复的本质是地层沉积演化的逆过程,而 地层演化的顺序为:沉积→褶皱→断裂。因此,该 区构造恢复顺序主要为:嫩江组去断层恢复→嫩江 组去褶皱恢复→登娄库组去断层恢复→登娄库组去 褶皱恢复→营城组去断层恢复→营城组去褶皱恢 复。构造恢复过程中构造模型的4个状态(图 5): ①营四段原始构造模型;②登娄库组沉积时期营四 段构造模型;③嫩江组沉积时期营四段构造模型; ④营四段现今构造模型。研究区营四段小断层较 多,此次工作选择控制研究区构造特征的7条断层 进行营四段构造恢复。7条断层均为正断层,其中 规模最大的为徐中断裂。

根据以上流程对研究区进行了构造恢复,得到 不同时期营四段的古构造图(图 6),可知:①营四段 沉积末期底面构造为营四段沉积时的古地貌,地势



①一营城组沉积时期; ②一登娄库组沉积时期; ③一嫩江组沉积时期; ④一现今

图 5 各时期研究区营四段构造模型

Fig. 5 Structural model of the YING-4 section of different periods in the study area

①-Depositional period of the Yingcheng formation; ②-Depositional period of the Denglouku formation; ③-Depositional period of the Nenjiang formation; ④-Now



a一营四段沉积末期底面构造图;b一登娄库组沉积末期营四段顶面构造图;c一嫩江组沉积末期营四段顶面构造图;d一现今营四段顶面构造图

图 6 各时期研究区营四段构造图

Fig. 6 Structural map of the YING-4 section of different periods in the study area

(a) The bottom structure of the YING-4 section at the end of the deposition; (b) The top structure of the YING-4 section at the end of the deposition of the Denglouku formation; (c) The top structure of the YING-4 section at the end of the deposition of the Nenjiang formation; (d) The top structure of the present YING-4 section

从中北部向周围降低,由于徐中断裂的控制导致断 层以东的地势最低(图 6a);②在登娄库组沉积时 期,营四段顶面呈现出北西一南东走向隆洼相间的 构造格局,因登娄库组沉积前的抬升遭受了轻微的 剥蚀作用(图 6b);③嫩江组沉积时期,营四段在构 造活动影响下地形地貌发生了改变,整体东西两边 高中间低,走向为北北西,沿徐中断裂的隆起也已 发育成斜坡形态,与现今构型形态相似(图 6c); ④嫩江组沉积之后的构造活动对营四段的影响较 弱,现今构造模型在嫩江组沉积前的基础上呈继承 性发育,形态基本保持一致,以局部的地区沉降为 主(图 6d)。

2.4 应变预测结果

对恢复出各时期的营四段地层进行应变计算, 得到各造缝期有限应变分布图(图 7)。营城末 期一登娄库期:在北北西向右旋走滑应力场影响 下,徐中断裂发生了走滑作用,局部受到挤压隆起, 形成了3组构造裂缝,以近南北向 R₁剪切裂缝为 主,地层由于褶皱及断裂作用产生了巨大的形变, 强度以徐中断裂西侧区域为最大(图 7a)。泉头一 青山口期:登娄库组沉积期徐家围子由断转坳,地 面发生了不均匀沉降,营城组末期形成的断层在登娄库组重新活动,核心部位再次变形,并在远离徐中断裂的区域形成了新的近南北走向的断层及伴生的裂缝系统,应变高值主要分布在原有断层附近,新生断层区域应变值较低(图7b)。嫩江期一现今:在北西向挤压应力场背景下,此期构造活动以产生构造反转为主,但对深层构造影响相对较小,应变高值仅分布在先存断层和改造中的斜坡部位附近,应变强度和区域相比前两期构造运动都有所下降(图7c)。裂缝的发育强度与应变大小密切相关,应变强度大,致密砂砾岩储层中的裂缝发育密度高。在储层岩性、埋深、基质物性相近的条件下,裂缝为气藏提供了重要的渗流通道,显著增强了储层的渗透性。

致密砂砾岩气产能的高低主要受储层物性、厚 度、埋藏深度、原始地层压力及压裂工艺的影响, 但对研究区范围来说,地层压力整体变化不大,压 裂技术工艺相同、规模相似,分析认为储层渗透率 和厚度是决定产能的主控因素,研究区产能在 50000 m³·d⁻¹以上层段对应的空气渗透率大于 0.25× 10⁻³ μm²(表 1),干层的渗透率小于 0.1×10⁻³ μm²(冯



a一营城末期一登娄库期有限应变分布图;b一泉头一青山口期有限应变分布图;c一嫩江期一现今有限应变图;d一三期叠加总有限应变分布图

图 7 研究区有限应变分布图

Fig. 7 Finite strain distribution in the study area

(a) Finite strain distribution map of the late Yingcheng–Denglouku period; (b) Finite strain distribution map of the Quantou–Qingshankou period;(c) Finite strain distribution map of the Nenjiang period–present; (d) Distribution map of the three-phase superimposed total finite strain

Table 1 Corresponding relationship between permeability and productivity of the tight gas reservoir in the Ying-4 section of the Xingcheng area, Xujiaweizi Rift (Feng et al., 2013)

井名	井段/m	渗透率/×10 ⁻³ µm ²	产能(压裂后)/(m³/d)
xs601	3461~3472	1.28	262641
fs5	3186~3210	0.25	49191
xs1	4435~4480	0.39	70000
	3364~3379	0.31	54758
xs5	3411~3422	0.16	6619

子辉等,2013),研究区储层孔隙度与产能的对应关 系呈显著正相关。由于岩心渗透率数据较少,为消 除储层厚度影响,以单位厚度产能为标准衡量储层 渗透率,进而对裂缝发育强度评价。

将研究区探井所在区域有限应变值与对数化处 理后的单位产量投影,发现单位产能与应变值间存 在明显的正相关性(图 8a),8口单位日产气在100 m³·d⁻¹·m⁻¹的高产探井有限应变值均在0.04以上, 因此,将应变值0.04作为构造裂缝是否发育的标 准。结合应变值与产能数据的关系,基于研究区叠 加有限应变分布图(图 7d)将裂缝发育带划分为3类,



a-试气产量与应变值关系图;b-裂缝发育区预测图

图 8 研究区裂缝发育分布区域验证图

Fig. 8 Verification map of fracture development and distribution area in the study area

(a) Relationship between test gas production and strain value; (b) Prediction map of the fracture development area

Ⅰ 类裂缝发育区: 单位日产气在 10000 m³・d⁻¹・m⁻¹ 以上,应变值处于0.085以上,构造裂缝最发育的区 域,裂缝倾角全部高于50°,集中分布在60°~80°,少 量裂缝受到了泥质和方解石的填充;发育与断层有 关的裂缝,以断层伴生裂缝为主,少量为断层活动 派生的裂缝,断层伴生裂缝和形成断层的构造应力 场相一致,因此主要形成北北东向和近南北向与断 层走向相同的裂缝,北西西向裂缝数量较少;此外, 还有两组北北西向和近东西向裂缝与断层呈共轭 的形式分布,其中北北西向裂缝相对不发育;在断 层附近,应变和裂缝分布具有明显的分带性。Ⅱ类 裂缝发育区:单位日产气在1000~10000 m³·d⁻¹·m⁻¹, 应变值处于 0.06~0.085, 裂缝发育区主要为断层周 围的区域,裂缝倾角分布在10°~80°,集中在50°~ 65°,低角度裂缝为滑脱裂缝,填充物主要为方解石, 发育褶皱相关裂缝,形成了近东西向、北北东向、 北东向的剪切裂缝以及近南北向的张裂缝,裂缝发 育强度明显减弱,符合褶皱控制下的裂缝特征。 Ⅲ类裂缝发育区:单位日产气在100~1000 m³·d⁻¹·m⁻¹, 应变值处于 0.04~0.06, 裂缝发育特征与Ⅱ级裂缝 发育带一致,裂缝几乎无填充,此区域为应力弱变 形区,不受断层影响,裂缝主要受褶皱挠曲控制,裂 缝的发育强度最小。其他区域:除上述划分的区域 外,构造裂缝发育强度低甚至不发育,应变值小于 0.04。构造裂缝发育区带平面划分结果如图 8b 所示。

3 讨论

3.1 裂缝的形成期次和应力场间的相互关系

营城组时期研究区以北西一南东方向伸展应力 场为主(孙庆春等,2007),同时构造带东西两侧伴 有右旋走滑,在研究区形成张扭应力场,造成徐中 断裂的右旋走滑,致使研究区既存在剪切作用又有 伸展作用。剪切物理模拟实验表明,在剪切变形过 程中应变主轴发生旋转会出现里德尔剪切系统,大 量实例显示断层在走滑过程中会出现一系列伴生 破裂构造(Rao et al., 2011; Chemenda et al., 2016; Luo et al., 2020;刘亢等,2021; Jacobi et al., 2021),相关构 造主要包括:主位移带(连续的走滑位移带,简称 PDZ)、R₁剪切(里德尔剪切)、R₂剪切(反向里德尔 剪切)、P剪切(同向剪切)、平行主剪切带的Y剪切 及张性T破裂。研究区的裂缝产状集中于3个区域 (图 4a),代表3种性质不同的裂缝,结合充填裂缝 的优势走向,由强到弱依次为北北东向、近南北向 及北东向,分别对应里德尔剪切系统中的张性 T 破 裂、 R_1 剪切、 R_2 剪切,早期 T 破裂形成的张性裂缝 更易被方解石充填而变成无效裂缝。结合里德尔 剪切系统与裂缝展布特征分析(图 4b),在营城组末 期右旋走滑的应力场下主要发育 R_1 剪切、 R_2 剪切 以及张性 T 破裂,P 剪切不发育与 P 剪切形成于 R_1 剪 切 和 R_2 剪 切 之后有关(Bartlett et al., 1981; Dooley and Schreurs, 2012; Jiang et al., 2020),徐中断 裂在营城组后停止了走滑活动,因此,营城组时期 处于剪切强度的高峰期。

在泉头组一青山口组时期东西向伸展应力场作 用下(王向东等,2022),主要形成南北走向的断层 及伴生裂缝系统,裂缝主要包括南北向的张裂缝和 近东西走向的剪裂缝,此期构造活动使营城组末期 形成的裂缝破裂程度增加,少量近南北向裂缝在二 次应力作用下发育为断层;嫩江组时期北北西向一 南南东向挤压应力场向北西方向转变(陈树民等, 2014),主要发育北西西向和近南北向的共轭剪切 裂缝,并切割早期形成的构造裂缝,增强了储层间 的连通性,但此次构造活动强度较小,对研究区营 城组构造裂缝发育强度的影响有限(侯贵廷等, 2004),形成的裂缝数量较少。现今研究区的地应 力是近东西向的挤压应力场,该时期构造活动弱, 裂缝发育情况差,不作为主要成缝期研究。

3.2 应变与裂缝发育强度间的关系

岩石受力产生变形,外力大于岩石受力强度极 限则会使岩石产生不连续构造,主要有2种类型 (Schultz and Fossen, 2008), 一是剪切强度、抗张强 度、硬度都小于母岩的构造,可增强流体连通性,如 层面、片理、裂缝和断层;二是剪切强度、硬度都高 于母岩的构造、但流体连通性差,如变形带、火山 岩墙和岩脉(Hudson et al., 2002; Oliveira et al., 2022)。 低孔隙度砂岩(孔隙度小于15%)变形产生第一类 不连续构造,主要受岩石的内部结构(矿物成分和 接触关系)、构造应力场以及化学条件(温度、压 力、流体)控制(Hasan and Alshibli, 2012; Cil et al., 2017)。研究区内砂砾岩的碎屑成分主要为石英、 长石和岩屑,其中石英颗粒的硬度最大,受力不易 变形,长石的硬度次之,岩屑最低,因此岩石成分中 岩屑含量高的岩石颗粒内部质点更易发生相对位 移,发生形变;颗粒间接触关系中点接触最不稳定,

研究区砂砾岩由于成岩过程中受到强烈的压实作 用,以线接触为主,这种接触关系利于岩石保持整 体形态,不利于地层发生变形。研究区范围内物源 和埋深相近,可以近似将岩性和化学条件看作一 致,有限应变分布的差异主要受构造应力场引起的 地层变形影响,在地应力作用下形成的断层和褶皱 是主要控制因素(Renani and Martin, 2018)。研究区 内的致密砂砾岩发生变形后,区域地层形成挠曲褶 皱发生破裂作用,形成大量小尺度裂缝,随着该区 域再次形变,造成微裂缝连接以及宏裂缝再活动, 最终形成断层(Fossen et al., 2007)。断层上盘的应 变值明显高于下盘,原因可能为正断层在传播过程 中由于地层空隙上盘再次发生褶皱作用:断层核心 区域即靠近断点位置的应变值明显较高,这也印证 了断层的形成过程,应变大的区域裂缝发育,宏观 上表现为断裂形式。地层应变是构造裂缝产生的 直接因素(胡明等,2010),根据各组裂缝形成时期 的有限应变分析(图7),裂缝主要于早白垩世构造 伸展期形成,晚白垩世挤压应力场形成的裂缝强度 有限。裂缝为研究区致密低渗透储层提供了储集 空间和渗透通道(曾联波等,2007),地层应变量相 对值间接反映裂缝的发育强度(吴满等,2010)。试 气井单位产气量与应变值成良好的正相关性(图 8a), 表明地层应变值越高,裂缝发育强度越大,单位储 层厚度的产气量越高。因此, I 类裂缝发育带产气 量高,区域内获得多口工业气流井,Ⅱ类裂缝发育 带可作为深层天然气的下一步挖潜的重要目标区。

储层的裂缝展布是个复杂的地质问题,且多数 油气储层的裂缝主要为构造裂缝,对构造裂缝的定 量预测评价应从两个方面综合研究,外因是岩石的 构造变形,内因是岩石性质,如将岩层的岩性、厚度 等与构造应变综合考虑,可以对储层产量更加精准 地预测。文章研究从外因出发,旨在揭示裂缝发育 程度与地层应变量的关系,同时提醒油气地质工作 者裂缝的成因复杂,在对裂缝展布研究前需厘定裂 缝的成因类型,以合适的方法手段才能做出有效的 裂缝综合预测评价。

4 结论

(1)利用应变属性可以预测构造裂缝的发育区域和强度,相比其他方法不受地震分辨率和复杂边界条件的限制,能揭示隐藏的裂缝发育位置,预测

的结果与生产情况一致,钻探情况很好地验证了预测结果的可靠性。

(2)以松辽盆地徐家围子断陷徐中地区营四段 为研究对象,进行了3期构造恢复,并正演到现今 的地质形态得到3期构造变形的有限应变分布图, 其中营城组末期和泉头组一青山口组沉积时期变 形较为强烈,嫩江组沉积之后的构造活动对深部地 层变形影响弱。

(3)预测了研究区构造裂缝的主要发育位置,裂缝主要分布在断层和褶皱发育的区域,受构造控制明显,有限应变值与裂缝发育强度呈强相关,有限应变值越大,构造裂缝越发育。根据有限应变值的大小对研究区划分了3类不同程度的裂缝发育区, I类裂缝发育区已钻井验证,再次勘探研究区深部天然气建议重点考虑Ⅱ类裂缝发育区。

致谢:感谢辽宁工程技术大学王兆生副教授在 成文中给予的宝贵建议;感谢编辑老师的辛勤工 作和审稿专家宝贵意见!

References

- BARTLETT W L, FRIEDMAN M, LOGAN J M, 1981. Experimental folding and faulting of rocks under confining pressure Part IX. Wrench faults in limestone layers[J]. Tectonophysics, 79(3-4): 255-277.
- BORKOVIĆ A, KOVAČEVIĆ S, RADENKOVIĆ G, et al., 2018. Rotationfree isogeometric analysis of an arbitrarily curved plane Bernoulli–Euler beam[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 334: 238-267.
- CARDOZO N, ALLMENDINGER R W, 2009. SSPX: A program to compute strain from displacement/velocity data[J]. Computers & Geosciences, 35(6): 1343-1357.
- CHEMENDA A I, CAVALIÉ O, VERGNOLLE M, et al., 2016. Numerical model of formation of a 3-D strike-slip fault system[J]. Comptes Rendus Geoscience, 348(1): 61-69.
- CHEN S M, JIANG C J, LIU L, et al., 2014. Fracture formation mechanism of volcanic rocks in Xujiaweizi fault depression of Songliao basin[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 44(6): 1816-1826. (in Chinese with English abstract)
- CHENG G Y, PANG J Y, ZHANG C S, 1988. Predicting method of the reservoir fracture system of the maukou formation in southern Sichuan [J]. Oil & Gas Geology, 9(1): 32-39. (in Chinese with English abstract)
- CHO Y, GIBSON R L, VASILYEVA M, et al., 2018. Generalized multiscale finite elements for simulation of elastic-wave propagation in fractured media[J]. Geophysics, 83(1): WA9-WA20.
- CIL M B, ALSHIBLI K A, KENESEI P, 2017. 3D experimental measurement of lattice strain and fracture behavior of sand particles using synchrotron X-ray diffraction and tomography[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 143(9): 04017048.

- DOOLEY T P, SCHREURS G, 2012. Analogue modelling of intraplate strikeslip tectonics: A review and new experimental results[J]. Tectonophysics, 574-575: 1-71.
- DURIEZ J, SCHOLTÈS L, DONZÉ F V, 2016. Micromechanics of wing crack propagation for different flaw properties [J]. Engineering Fracture Mechanics, 153; 378-398.
- FENG Z H, YIN C H, LU J M, et al., 2013. Formation and accumulation of tight sandy conglomerate gas: a case from the Lower Cretaceous Yingcheng formation of Xujiaweizi fault depression, Songliao basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 40(6); 650-656. (in Chinese with English abstract)
- FISK J C, MARFURT K J, COOKE D, 2010. Correlating heterogeneous production to seismic curvature attributes in an Australian coalbed methane field[C]//2010 SEG annual meeting. Denver: SEG Technical Program Expanded Abstracts: 2323-2328.
- FOSSEN H, SCHULTZ R A, SHIPTON Z K, et al., 2007. Deformation bands in sandstone: a review[J]. Journal of the Geological Society, 164(4): 755-769.
- FU X F, SHA W, YU D, et al., 2010. Lateral sealing of faults and gas reservoir formation in volcanic rocks in Xujiaweizi fault depression[J]. Geological Review, 56(1): 60-70. (in Chinese with English abstract)
- GIBBS A D, 1983. Balanced cross-section construction from seismic sections in areas of extensional tectonics[J]. Journal of Structural Geology, 5(2): 153-160.
- GONG L, FU X F, WANG Z S, et al., 2019. A new approach for characterization and prediction of natural fracture occurrence in tight oil sandstones with intense anisotropy [J]. AAPG Bulletin, 103(6): 1383-1400.
- GONG L, GAO S, WU J P, et al., 2017. Natural gas accumulation and fractures in volcanic rocks of Yingcheng formation in Xujiaweizi fault depression[J]. Geotectonica et Metallogenia, 41(2): 283-290. (in Chinese with English abstract)
- HASAN A, ALSHIBLI K, 2012. Three dimensional fabric evolution of sheared sand[J]. Granular Matter, 14(4): 469-482.
- HOU G T, FENG D C, WANG W M, et al., 2004. Reverse structures and their impacts on hydrocarbon accumulation in Songliao basin[J]. Oil & Gas Geology, 25(1): 49-53. (in Chinese with English abstract)
- HU M, FU G, LV Y F, et al., 2010. The fault activity period and its relationship to deep gas accumulation in the Xujiaweizi depression, Songliao basin[J]. Geological Review, 56(5): 710-718. (in Chinese with English abstract)
- HUDSON J A, HARRISON J P, POPESCU M E, 2002. Engineering rock mechanics: an introduction to the principles[J]. Applied Mechanics Reviews, 55(2): B30.
- JACOBI R, STARR J, ECKERT C, et al., 2021. Relay ramps and rhombochasms in the northern Appalachian Basin: extensional and strike-slip tectonics in the Marcellus Formation and Utica Group[J]. AAPG Bulletin, 105(10): 2093-2124.
- JIANG D W, ZHANG S M, DING R, 2020. Surface deformation and tectonic background of the 2019 M_s 6.0 Changning earthquake, Sichuan basin, SW China[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 200: 104493.
- JIANG R, ZHAO L, XU A Z, et al., 2022. Sweet spots prediction through fracture genesis using multi-scale geological and geophysical data in the

karst reservoirs of Cambrian Longwangmiao carbonate formation, Moxi-Gaoshiti area in Sichuan basin, South China[J]. Journal of Petroleum Exploration and Production Technology, 12(5): 1313-1328.

- LAUBACH S E, EICHHUBL P, HARGROVE P, et al., 2014. Fault core and damage zone fracture attributes vary along strike owing to interaction of fracture growth, quartz accumulation, and differing sandstone composition[J]. Journal of Structural Geology, 68: 207-226.
- LIU G P, ZENG L B, LEI M S, et al., 2016. Fracture development characteristics and main controlling factors of the volcanic reservoir in Xujiaweizi fault depression[J]. Geology in China, 43(1): 329-337. (in Chinese with English abstract)
- LIU J Z, HAN L, SHI L, et al., 2021. Seismic prediction of tight sandstone reservoir fractures in XC area, western Sichuan Basin[J]. Oil & Gas Geology, 42(3): 747-754. (in Chinese with English abstract)
- LIU K, LI Y F, GUO H W, et al., 2021. Determination of surface rupture length and analysis of Riedel shearstructure of the Litang M7.3 earthquake in west Sichuan in 1948[J]. Acta Geologica Sinica, 95(8): 2346-2360. (in Chinese with English abstract)
- LIU X Y, JI Y F, HUANG S M, et al., 2011. Analysis of invariants in strain tensor matrixes of crustal deformation[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 31(4): 66-70. (in Chinese with English abstract)
- LUO J, EVANS S G, PEI X J, et al., 2020. Anomalous co-seismic surface effects produced by the 2014 Mw 6.2 Ludian earthquake, Yunnan, China: an example of complex faulting related to Riedel shear structures[J]. Engineering Geology, 266: 105476.
- LYU W Y, MIAO F B, ZHANG B J, et al., 2020. Fracture characteristics and their influence on natural gas production: a case study of the tight conglomerate reservoir in the Upper Triassic Xujiahe formation in Jian' gearea, Sichuan basin[J]. Oil & Gas Geology, 41(3):484-491; 557. (in Chinese with English abstract)
- MA R H, WANG A Z, 2006. Mapping palaeostructural evolution with tectonic reconstruction theory[J]. Natural Gas Industry, 26(1): 34-36. (in Chinese with English abstract)
- MARRETT R, GALE J F W, GÓMEZ L A, et al., 2018. Correlation analysis of fracture arrangement in space[J]. Journal of Structural Geology, 108: 16-33.
- MEANS W D, 1976. Stress and strain[M]. New York: Springer.
- OLIVEIRA L S B, NOGUEIRA F C C, VASCONCELOS D L, 2022. Mechanical stratigraphy influences deformation band pattern in arkosic sandstones, Rio do Peixe Basin, Brazil[J]. Journal of Structural Geology, 155: 104510.
- OZKAYA S I, 2019. Validating predicted fracture corridors by statistical comparison with well data[J]. SPE Reservoir Evaluation & Engineering, 22(4): 1385-1398.
- QIU Y X, 2000. On the method of tectonic sieving[J]. Journal of Geomechanics, 6(1): 33-43. (in Chinese with English abstract)
- RAO G, LI A M, YAN B, et al., 2011. Co-seismic Riedel shear structures produced by the 2010 M_w 6.9 Yushu earthquake, central Tibetan Plateau, China[J]. Tectonophysics, 507(1-4): 86-94.
- REN H L, LIU C L, LIU W P, et al., 2020. Stress field simulation and fracture development prediction of the Wufeng formation—Longmaxi formation in the Fushun-Yongchuan block, Sichuan basin[J]. Journal of Geomech-

anics, 26(1): 74-83. (in Chinese with English abstract)

- RENANI H R, MARTIN C D, 2018. Cohesion degradation and friction mobilization in brittle failure of rocks[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 106: 1-13.
- SCHULTZ R A, FOSSEN H, 2008. Terminology for structural discontinuities[J]. AAPG Bulletin, 92(7): 853-867.
- SUN Q C, SUN X M, WANG P J, et al., 2007. Joint structure features, distribution regularity and reservoir prediction of Yingcheng formation in Eastern Songliao basin[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 37(6); 1091-1096. (in Chinese with English abstract)
- WANG X D, WANG R, SHI W Z, et al., 2022. Tectonic characteristics and evolution of typical rift basins in eastern China: a case study in the Gudian area, Songliao basin[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 41(3): 85-95. (in Chinese with English abstract)
- WANG Z S, DONG S Q, MENG N N, et al., 2020. Fracture network in the low-permeability fault block reservoirs in deep-buried Gaoshangpu oilfield, Bohai Bay basin, and its controlling factors [J]. Oil & Gas Geology, 41(3):534-542: 626. (in Chinese with English abstract)
- WEN H J, SHU P, FAN C W, et al., 2008. Reservoir space type and control factors of the deep conglomerate reservoir in Xingcheng gas field[J]. Journal of Daqing Petroleum Institute, 32(3): 101-104. (in Chinese with English abstract)
- WITHJACK M O, PETERSON E T, 1993. Prediction of normal-fault geometries-a sensitivity analysis[J]. AAPG Bulletin, 77(11): 1860-1873.
- WU M, YANG F L, LU J L, 2010. Predication of fractures in the volcanic reservoirs in the east of the Songliao basin[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 17(5): 60-62. (in Chinese with English abstract)
- XIAO F S, CHEN K, RAN Q, et al., 2018. New understandings of the seismic modes of high productivity wells in the Sinian Dengying Fm gas reservoirs in the Gaoshiti area, Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry B, 5(5): 499-507.
- XIE J T, QIN Q R, FAN C H, 2019. Quantitative prediction of fracture distribution of the Longmaxi formation in the Dingshan area, China using FEM numerical simulation[J]. Acta Geologica Sinica, 93(6): 1662-1672.
- ZENG L B, QI J F, WANG Y X, 2007. Origin type of tectonic fractures and geological conditions in low-permeability reservoirs[J]. Acta Petrolei Sinica, 28(4): 52-56. (in Chinese with English abstract)
- ZENG L B, SU H, TANG X M, et al., 2013a. Fractured tight sandstone oil and gas reservoirs: a new play type in the Dongpu depression, Bohai bay basin, China[J]. AAPG Bulletin, 97(3): 363-377.
- ZENG W T, ZHANG J C, DING W L, et al., 2013b. Fracture development in Paleozoic shale of Chongqing area (South China). Part one: fracture characteristics and comparative analysis of main controlling factors[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 75: 251-266.
- ZHANG J B, LIU S L, DAI J S, et al., 2019. The quantitative prediction of structural fractures in ordovician reservoir in Yu-bei area, Tarim basin[J]. Journal of Geomechanics, 25(2): 177-186. (in Chinese with English abstract)
- ZHANG Y G, CHEN S M, ZHANG E H, et al., 2010. The new progress of Xujiaweizi fault depression characteristics of structural geology research[J]. Acta Petrologica Sinica, 26(1): 142-148. (in Chinese with English abstract)

附中文参考文献

- 陈树民,姜传金,刘立,等,2014. 松辽盆地徐家围子断陷火山岩裂缝 形成机理[J].吉林大学学报(地球科学版),44(6):1816-1826.
- 程光瑛, 庞加研, 张长盛, 1988. 川南地区茅口组储层裂缝系统预测 方法探讨[J]. 石油与天然气地质, 9(1): 32-39.
- 冯子辉,印长海,陆加敏,等,2013.致密砂砾岩气形成主控因素与富 集规律:以松辽盆地徐家围子断陷下白垩统营城组为例[J].石 油勘探与开发,40(6):650-656.
- 付晓飞, 沙威, 于丹, 等, 2010. 松辽盆地徐家围子断陷火山岩内断层 侧向封闭性及与天然气成藏[J]. 地质论评, 56(1): 60-70.
- 巩磊,高帅,吴佳朋,等,2017.徐家围子断陷营城组火山岩裂缝与天 然气成藏[J].大地构造与成矿学,41(2):283-290.
- 侯贵廷,冯大晨,王文明,等,2004. 松辽盆地的反转构造作用及其对 油气成藏的影响[J].石油与天然气地质,25(1):49-53.
- 胡明,付广,吕延防,等,2010.松辽盆地徐家围子断陷断裂活动时期 及其与深层气成藏关系分析[J].地质论评,56(5):710-718.
- 刘国平,曾联波,雷茂盛,等,2016.徐家围子断陷火山岩储层裂缝发 育特征及主控因素[J].中国地质,43(1):329-337.
- 刘俊州,韩磊,时磊,等,2021.致密砂岩储层多尺度裂缝地震预测技术:以川西 XC 地区为例[J].石油与天然气地质,42(3):747-754.
- 刘亢,李岩峰,郭辉文,等,2021.1948年川西理塘 M7.3 地震地表破裂 特征及 Riedel 剪切构造分析 [J]. 地质学报,95(8):2346-2360.
- 刘序俨,季颖锋,黄声明,等,2011.地形变应变张量矩阵的不变量分析[J].大地测量与地球动力学,31(4):66-70.
- 吕文雅, 苗凤彬, 张本键, 等, 2020. 四川盆地剑阁地区须家河组致密 砾岩储层裂缝特征及对天然气产能的影响[J]. 石油与天然气地 质, 41(3): 484-491,557.
- 马如辉,王安志,2006.利用构造恢复原理制作古构造演化图[J].天 然气工业,26(1):34-36.
- 丘元禧, 2000.论构造筛分[J].地质力学学报, 6(1): 33-43.
- 任浩林,刘成林,刘文平,等,2020.四川盆地富顺-永川地区五峰组: 龙马溪组应力场模拟及裂缝发育区预测[J].地质力学学报, 26(1):74-83.
- 孙庆春,孙晓猛,王璞珺,等,2007. 松辽盆地东缘营城组节理构造特征、分布规律及其储层预测[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 37(6):1091-1096.
- 王向东, 王任, 石万忠, 等, 2022. 中国东部典型裂谷盆地构造活动特 征及演化: 以松辽盆地孤店断陷为例[J]. 地质科技通报, 41(3): 85-95.
- 王兆生,董少群,孟宁宁,等,2020. 渤海湾盆地高尚堡深层低渗透断 块油藏缝网系统及其主控因素 [J]. 石油与天然气地质,41(3): 534-542,626.
- 文慧俭,舒萍,范传闻,等,2008.兴城气田深层砾岩储层储集空间类型及控制因素[J].大庆石油学院学报,32(3):101-104.
- 吴满,杨风丽,陆建林,2010.松辽盆地东部地区火山岩储层裂缝预 测研究[J].特种油气藏,17(5):60-62.
- 曾联波,漆家福,王永秀,2007.低渗透储层构造裂缝的成因类型及 其形成地质条件[J].石油学报,28(4):52-56.
- 张继标,刘士林,戴俊生,等,2019. 塔里木盆地玉北地区奥陶系储层 构造裂缝定量预测[J]. 地质力学学报,25(2):177-186.
- 张元高,陈树民,张尔华,等,2010.徐家围子断陷构造地质特征研究 新进展[J].岩石学报,26(1):142-148.