

•碳中和与清洁能源•

DOI:10.12454/j.jsuese.202400483



本刊网刊

页岩储层 3 维平面断层重构及几何特征描述

高雷雨¹, 石祥超^{1*}, 范存辉², 贾熹文¹, 于兴川¹, 张豪¹, 张琴¹

(1. 西南石油大学 油气藏地质及开发工程全国重点实验室, 四川 成都 610500; 2. 西南石油大学 地球科学与技术学院, 四川 成都 610500)

摘要:页岩储层断层的 3 维精细化重构和描述与页岩储层成藏、保存条件研究密切相关, 且对揭示工程套管变形机理等具有重要意义。利用 3 维地震勘探断层数据, 建立了以奇异值分解算法为核心的 3 维平面断层重构方法, 对川南某一页岩气储层奥陶系五峰组—志留系龙马溪组断层进行了精细重构, 深入讨论了断层的几何特征。研究结果表明: 该页岩气地区发育了 86 条断层, 主要是以南偏东 SE 倾向和北偏西 NW 倾向的中低角度断层构成, 高角度断层发育少。邻近页岩气储层的 4 条大型断层自页岩气底部滑脱层平缓发育, 穿过储层后断层倾角变大, 最终发育到二叠系茅口组, 呈现为上部高角度断层。在断层几何尺度方面, 区域断层最长可达 42.84 km, 大部分断层小于 11 km。断层长度、面积分布满足幂律长尾分布特征。断层垂向延伸一般在 2 km 左右; 横向延伸一般为 2 km, 最长延伸可达 6 km。研究结果显著促进了对川南某深层页岩气断层几何特征的认识, 研究方法可推广至其他区域。

关键词:川南页岩气; 断层分布; 断层重构; 几何特征; 3 维平面断层

中图分类号: TE121

文献标志码: A

文章编号: 2096-3246(2026)01-0355-13

川南地区是深层页岩气(3 500~4 500 m)开发的关键地区, 其中, 奥陶系五峰组—志留系龙马溪组具备丰富的油气资源潜力, 资源量为 $16.31 \times 10^{12} \text{ m}^3$, 占该地区总资源的 84%^[1]。为了更好地开发川南页岩气资源, 对页岩储层结构的准确描述和分析变得至关重要。断层是页岩储层中影响流体运移和储层性质的关键地质构造之一^[2]。

3 维断层重构及几何特征描述是页岩气开发工程地质一体化过程中的一项关键任务^[3]。通过对断层的几何特征进行详细描述和分析, 能够揭示断层对储层中流体运移、孔隙结构, 以及岩石物理性质的影响^[4-5]。目前, 断层重构方法主要包括球棍建模^[6-7]、基于棱柱建模^[8]、结构化网格建模^[8-9]、隐函数建模^[10]等。球棍模型“以直代曲”进行近似描述, 其特点在于断层的几何特征由上下两条线控制, 断层倾角保持不变, 故不能描述断层的起伏特征, 在断层自锁、力

学稳定性研究等方面有很大的局限性。基于棱柱建模更多关注地质体网络优劣性, 忽视了断层面的特征。结构化网格建模和隐函数建模对于断层几何特征的建模效果最好, 能描述断层的曲面特征和连接关系。

目前, 研究者针对川南长宁、威远和泸州等页岩气开发区从构造演化过程^[11-12]、油气成藏关系^[13-16]等方面分析了断层特征, 提升了对川南页岩气成藏富集的认识水平^[16-19]。在 3 维几何方面, 长宁页岩气开发区基底主断层呈现上陡下缓的结构特征^[20]。页岩储层断层的走向、倾角、长度等几何特征对研究油气运移、储层性质等具有重要意义^[21-22]。长宁等川南地区页岩气开发实践表明: 构造变形越强烈, 对页岩气保存的破坏作用越明显; 与主断层距离近的气藏受到强烈破坏, 会使页岩气产量较低; 而次级断裂发育的地方有利于游离气聚集, 会使页岩气高产^[23-24]。此外, 页岩气

收稿日期: 2024-06-25 修回日期: 2024-11-02 网络出版日期: 2025-03-04

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(企业联合基金)(U24B2038); 四川省科技厅重点研发计划(2023YFH0005; 2022YFSY0007); 四川省中央引导地方科技发展专项(2023ZYD0154); 中国石油-西南石油大学创新联合体项目(2020CX040103); 西南石油大学研究生科研创新基金项目(2022KYCX002)

作者简介: 高雷雨(1997—), 男, 博士生。研究方向: 断层滑移、井壁稳定等地质力学。E-mail: gao-leiyu@qq.com

*通信作者: 石祥超, 教授, E-mail: sxcdream@swpu.edu.cn

产量还与断层的几何特征如层位、走向等参数紧密相关。断层倾角对于页岩气垂向运移影响很大,中-高角度断层在一定程度上损坏了页岩气储层的自封性能,而低角度裂缝则有利于页岩气的保存^[25]。

在页岩气开发实践过程中,川南某深层页岩气井的套变率高达 51.0%,严重影响压裂效果,制约了页岩气的高效开发,这已被证实与断层滑移有关^[26]。对于工程因素导致的套变,最主要的防控措施是布井时尽量避让高激活风险和高滑移风险断层。针对川南某页岩气开发区,目前的研究只给出了一些主要断层的平面几何信息^[27],缺乏全域的断层勘探开发认识,更没有关于断层的 3 维空间展布和几何特征的认识。

因此,基于 3 维地震数据,本文提出了一种以奇异值分解算法为核心的 3 维平面断层重构方法,以提升页岩储层断层几何描述的精度。并且,对川南某页岩气储层奥陶系五峰组-志留系龙马溪组断层进行了精细重构,系统分析了川南某页岩气开发区断层的几何特征,界定了邻近页岩气储层的大型断层从底部滑脱层到上部高角度断层的发育规律,为断层与储层耦合作用研究提供了新视角。研究成果提升了对川南某深层页岩气储层断层发育特征的认识水平,可用于解决套管变形等工程问题,支撑了川南深层页岩气的高效开发,对推动页岩气的勘探开发也具有重要意义。

1 断层 3 维重构

川南地区 3 维地震勘探面积超过 2 000 km²,通过 3 维地震勘探解释,得到断层描述系列数据点,共计两万多个。对这些 3 维断层数据点进行精细的断层重构,并分析其几何特征,有助于推动川南某页岩气勘探开发进展。

1.1 3 维平面断层重构理论

对于断层的 n 个 3 维数据点 (p_1, p_2, \dots, p_n) , 需要确定其最优拟合平面。假设断层数据点的平均值点 $p_a(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z})$ 位于断层平面内,单位向量 $\hat{n}(a, b, c)$ 垂直于平面,可以确定其法线方向。3 维空间中,平面方程有多种方式,其中平面方程的一般方程为:

$$ax + by + cz + d = 0 \quad (1)$$

式中, a, b, c 为平面法向量的分量, d 为常数项, x, y, z 为空间中任意一点的坐标。

平均值点 $p_a(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z})$ 通过断层平面,则平面方程可表示为:

$$a\bar{x} + b\bar{y} + c\bar{z} + d = 0 \quad (2)$$

式中, $\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}$ 为坐标 x, y, z 方向上的平均值。

将式(1)、(2)组合,可得:

$$a(x - \bar{x}) + b(y - \bar{y}) + c(z - \bar{z}) = 0 \quad (3)$$

由这一系列数据点,可以得到特征矩阵:

$$A = \begin{bmatrix} x_1 - \bar{x} & y_1 - \bar{y} & z_1 - \bar{z} \\ x_2 - \bar{x} & y_2 - \bar{y} & z_2 - \bar{z} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ x_n - \bar{x} & y_n - \bar{y} & z_n - \bar{z} \end{bmatrix} \quad (4)$$

那么,断层平面一般方程的系数 a, b, c 为未知数,则列向量 $X = [a, b, c]^T$ 。将协方差矩阵 A 和列向量代入式(3),可得:

$$AX = 0 \quad (5)$$

理想情况下,所有的点都应该位于平面上。然而,有些点却处于断层平面外。其中,某个数据点到平面的距离为 d ,则有第 i 个点到平面的距离为:

$$d_i = \sqrt{(x_i - \bar{x})^2 + (y_i - \bar{y})^2 + (z_i - \bar{z})^2} \quad (6)$$

拟合过程需要确保所有的点与平面的距离最小,则有目标函数:

$$\min \sum_{i=1}^n d_i = \min \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^3 A_{ij} \quad (7)$$

式中, A_{ij} 为第 i 个点在第 j 方向的偏差的平方。

因此,目标函数又可以表示为矩阵的二阶范数最小:

$$\min \|AX\| \quad (8)$$

要求断层平面一般方程的系数 a, b, c 不全为 0,且有约束条件:

$$\|X\| = 1 \quad (9)$$

即数学问题为:

$$\begin{cases} \min \|AX\|, \\ \|X\| = 1 \end{cases} \quad (10)$$

为了衡量矩阵的“规模”特性,计算矩阵的二阶范数等于计算谱范数,即:

$$\|A\| = \sqrt{\lambda_{\max}(A^T A)} \quad (11)$$

式中, λ_{\max} 为矩阵 $A^T A$ 的最大特征值。矩阵 A 的谱范数就是矩阵 A 的最大奇异值。计算 AX 二阶范数的最小值,就是寻找列向量 X 使 AX 的二阶范数最小。

数学问题恒等变形为:

$$\begin{cases} \min \|AX\| = \min \|X^T A^T AX\| = \\ \min \sqrt{\lambda_{\max}(X^T A^T AX)}, \\ \|X\| = 1 \end{cases} \quad (12)$$

如果矩阵 A 可以被奇异值分解,那么 $A = UDV^T$ 。其中: U 为 m 阶酉矩阵,满足 $U^T U = I$, I 为单位矩阵; V

为 n 阶酉矩阵,满足 $V^T V = I$; D 为对角矩阵,具体可以表示为:

$$D = \begin{bmatrix} \sigma_{\max} & & & \\ & \ddots & & \\ & & \sigma_{\min} & \\ & & & 0 \end{bmatrix}_{m \times n} \quad (13)$$

对角矩阵 D 的 r 个对角元素由大到小排列为 $\sigma_{\max}, \dots, \sigma_{\min}$,其中, σ_{\max} 为最大奇异值, σ_{\min} 为最小奇异值,奇异值分解如下:

$$\|AX\| = \|UDV^H X\| = \|DV^T X\| \quad (14)$$

则矩阵 A 结合奇异值分解式 (14), 令 $V = [V_1, V_2, \dots, V_n]$, 可得:

$$A^T A = VD^T U^T U D V^T = VD^T D V^T = V \begin{bmatrix} \sigma_{\max}^2 & & & \\ & \ddots & & \\ & & \sigma_{\min}^2 & \\ & & & 0 \end{bmatrix}_{n \times n} V^T = [V_1, V_2, \dots, V_n] \begin{bmatrix} \sigma_{\max}^2 & & & \\ & \ddots & & \\ & & \sigma_{\min}^2 & \\ & & & 0 \end{bmatrix}_{n \times n} \begin{bmatrix} V_1^T \\ V_2^T \\ \vdots \\ V_n^T \end{bmatrix} = \sigma_{\max}^2 V_1 V_1^T + \sigma_2^2 V_2 V_2^T + \dots + \sigma_{\min}^2 V_r V_r^T \quad (15)$$

式中, V_r 为酉矩阵 V 的第 r 个列向量。

由于 V 是酉矩阵,根据酉矩阵性质 $V^T V = I$,可知 $\|V_i\| = 1, V_i^T V_j = 0$,则由式 (15) 可得:

$$A^T A = \sigma_{\max}^2 V_1 V_1^T + \sigma_2^2 V_2 V_2^T + \dots + \sigma_{\min}^2 V_r V_r^T \quad (16)$$

若让列向量 X 由基向量 V_i 线性表示,即 $X = \sum_i k_i V_i$ 或者是 $X = k_1 V_1 + k_2 V_2 + \dots + k_n V_n$ (k_i 为特征空间方向 V_i 的分量系数),则由式 (16) 可得:

$$X^T A^T A X = [k_1, k_2, \dots, k_n] \begin{bmatrix} V_1^T \\ V_2^T \\ \vdots \\ V_n^T \end{bmatrix} \times \left[\sigma_{\max}^2 V_1 V_1^T + \dots + \sigma_{\min}^2 V_r V_r^T \right] \times [V_1, V_2, \dots, V_n] \begin{bmatrix} k_1 \\ k_2 \\ \vdots \\ k_n \end{bmatrix} = \sigma_{\max}^2 k_1^2 V_1^T V_1 V_1^T V_1 + \dots + \sigma_{\min}^2 k_r^2 V_r^T V_r V_r^T V_r \quad (17)$$

由于矩阵 V 为酉矩阵, $V^T V = I$,可知 $V_1^T V_1 = V_2^T V_2 = \dots = V_n^T V_n = 1$,则式 (17) 简化为:

$$X^T A^T A X = \sigma_{\max}^2 k_1^2 + \dots + \sigma_{\min}^2 k_r^2 \quad (18)$$

根据约束条件, $\|X\| = 1$,求解向量的二阶范数如下:

$$\|X\| = (X^H X)^{\frac{1}{2}} = (X^T X)^{\frac{1}{2}} = [k_1, k_2, \dots, k_n] \begin{bmatrix} V_1^T \\ V_2^T \\ \vdots \\ V_n^T \end{bmatrix} [V_1, V_2, \dots, V_n] \begin{bmatrix} k_1 \\ k_2 \\ \vdots \\ k_n \end{bmatrix} = k_1^2 V_1^T V_1 + k_2^2 V_2^T V_2 + \dots + k_n^2 V_n^T V_n \quad (19)$$

再次利用矩阵 V 为酉矩阵, $V^T V = I$,可知 $V_1^T V_1 = V_2^T V_2 = \dots = V_n^T V_n = 1$,则式 (19) 简化为 $\|X\| = k_1^2 + k_2^2 + \dots + k_n^2 = 1$,即 $\sum_i k_i^2 = 1$ 。

使式 (18) 取最小值的情况是 $k_r = 1, k_i (i \neq r) = 0$ 。

根据 $X = k_1 V_1 + k_2 V_2 + \dots + k_n V_n$ 的线性表出方式,此时, $X = V_r$,是最小奇异值对应的列向量。所以,求解上述数学问题式 (12) 的解是对矩阵 A 进行奇异值分解,其中,最小奇异值对应的右奇异向量的列向量就是数学问题的解。

R^2 是回归问题的常见模型评估指标。因此,评价断层拟合效果可以使用拟合系数 R^2 来确定,其数学定义为:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_i (\hat{y}_i - y_i)^2}{\sum_i (y_i - \bar{y})^2} \quad (20)$$

式中: R^2 为拟合系数,是无因次量; \hat{y}_i 为预测值; y_i 为原始数据; \bar{y} 为原始数据的平均值。

1.2 3 维平面断层重构流程

根据 3 维数据点拟合平面方程的流程如下:

第 1 步, 求出 3 维数据点的平均值点 p_a ;

第 2 步, 根据式 (4) 计算系数矩阵 A ;

第 3 步, 对矩阵 A 进行奇异值分解;

第 4 步, 得到最小奇异值和最小奇异值对应的右奇异向量;

第 5 步, 令平面方程的法向量等于最小奇异值对应的右奇异向量;

第 6 步, 根据平面方程的法向量 n_w 和平均值点 p_a , 依据平面方程点法式 (1) 得到平面方程;

第 7 步, 给出回归效果评价值 R^2 。

拟合出的平面是无限大平面,而断层平面是有限平面。因此,需要分析基于真实断层边界的数据,从而确定 3 维断层平面断层的边界范围。一种方法是格雷厄姆扫描算法 (Graham scan algorithm),用于求解凸包问题的计算方法,在计算几何学中,凸包是一个包围点集中所有点的最小凸多边形。另一种方法是 Alpha Shape 算法,被称为滚球法,是一种形成非凸边界以提取边界点的算法。与格雷厄姆扫描算法相比,Alpha Shape 算法能计算凹包情形,且对多个点云时能勾勒出多个边界线,3 维平面断层重构流程如图 1 所示。

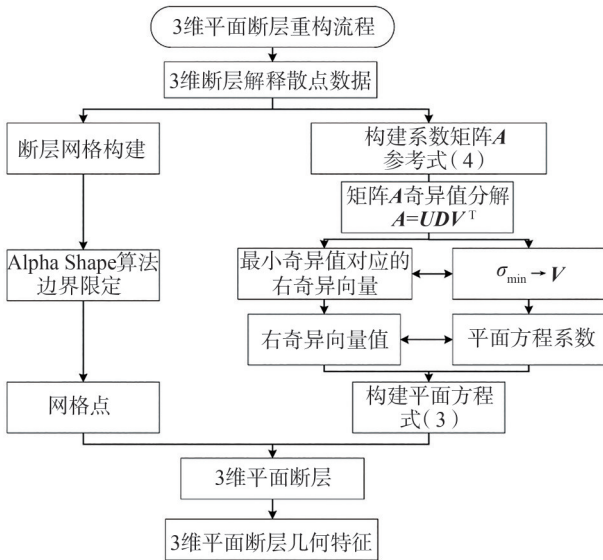


图 1 3 维平面断层重构流程图

Fig. 1 3D planar tomographic reconstruction flowchart

1.3 3 维平面断层几何性质

断层倾角 θ 是通过断层平面法向量 $\mathbf{n}(a, b, c)$ 与 z 轴的单位向量求向量余弦所得, 计算式如下:

$$\cos \theta = \frac{\mathbf{n}z}{|\mathbf{n}| |z|} = \frac{(a, b, c)(0, 0, 1)}{\sqrt{a^2 + b^2 + c^2} \times 1} \quad (21)$$

断层法向量 $\mathbf{n}(a, b, c)$ 在 x, y 平面投影 $\mathbf{n}'(a, b)$ 与 x 轴的断层夹角 l 的计算如式 (22) 所示, 其范围为 $0 \sim 180^\circ$, 而断层倾角的范围为 $0 \sim 360^\circ$ 。

$$\cos l = \frac{\mathbf{n}'x}{|\mathbf{x}| |\mathbf{n}'|} = \frac{(a, b)(1, 0)}{\sqrt{a^2 + b^2} \times 1} = \frac{a}{\sqrt{a^2 + b^2}} \quad (22)$$

需要注意的是, 式 (21) 无法判断断层法向量 $\mathbf{n}(a, b, c)$ 与 x 轴是右旋还是左旋。如果 b 值大于 0, 断层法向量投影在 x 轴的上方, 那么, x 轴逆时针旋转到断层法向量方向, 为右旋, 断层倾角值为正; 如果 b 值小于 0, 断层法向量投影在 x 轴的下方, x 轴顺时针旋转到断层法向量方向, 为左旋, 断层倾角值为负。由此满足断层倾角范围为 $0 \sim 360^\circ$ 。

基于边界点, 通过计算两两边界点之间的长度, 累加求和, 计算出边界的周长:

$$l = \sum_i d_i \quad (23)$$

基于平面拟合方程可以计算出平面断层的面积。由 3 维几何点构成的平面断层, 可被视作一个任意的多边形。任意多边形的面积计算如下: 首先, 在任意多边形内部任选一点, 其中, 一个简单的内部点为 3 维坐标的平均值点 $p_d(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z})$, 拟合平面是基于该点产生的, 所以, 该点也一定位于该几何多边形内部。然后, 由该点连接断层的边界点, 通过计算内部小三角形的面积, 累加求和, 即可得到平面断层的面积。

在空间直角坐标系中, 根据 3 点坐标利用向量的叉乘计算得到三角形面积。向量的叉乘是以向量为边的平行四边形的面积, 则三角形面积为平行四边形面积的一半。考虑到空间直角坐标系 3 点 $p_1(x_1, y_1, z_1)$ 、 $p_2(x_2, y_2, z_2)$ 、 $p_3(x_3, y_3, z_3)$, 其面积计算公式为:

$$S_{\Delta p_1 p_2 p_3} = \frac{1}{2} \overline{p_1 p_2} \times \overline{p_1 p_3} = \frac{1}{2} \left| \det \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ x_2 - x_1 & y_2 - y_1 & z_2 - z_1 \\ x_3 - x_1 & y_3 - y_1 & z_3 - z_1 \end{bmatrix} \right| \quad (24)$$

图 2 给出了断层 3 维平面拟合与边界特征分析的示意图。

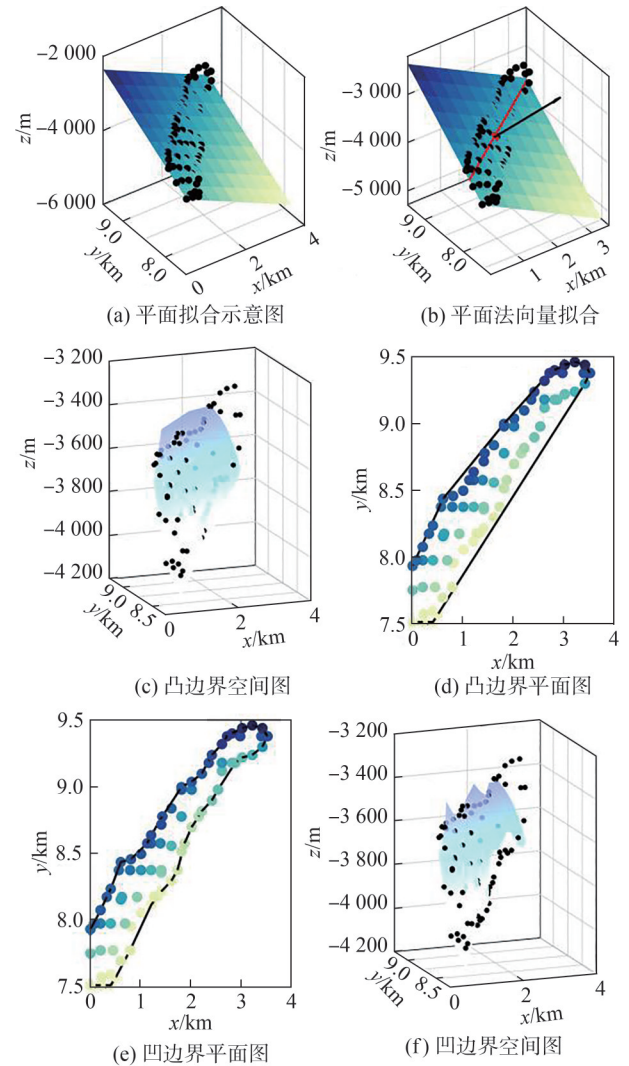


图 2 断层 3 维平面拟合示意图

Fig. 2 Schematic diagram of 3D planar fitting of faults

断层平面拟合示意如图 2(a) 所示, 呈现拟合平面与空间分布点的对应关系; 平面法向量拟合结果如图 2(b) 所示, 通过不同方向标志线 (红色、黑色线) 反映平面朝向与拟合精度; 凸边界空间如图 2(c) 所示, 直观呈现凸边界在 3 维空间的形态分布特征; 凸边界平

面如图 2(d)所示,将凸边界特征投影至 2 维平面以便于分析;凹边界平面与凹边界空间分别如图 2(e)、(f)所示,对比展示凹边界的 2 维形态及 3 维空间延伸特点,为精准刻画断层形态与边界提供多维度支撑。

设断层散点的法线与拟合平面的交点为 $P_b(x_1, y_1, z_1)$, 已知断层拟合 3 维平面的一般方程为 $ax + by + cz + d = 0$, 某断层散点 $P_a(x_0, y_0, z_0)$ 。根据 $P_b P_a$ 与断层法向量平行, 则有 $(x_1 - x_0, y_1 - y_0, z_1 - z_0) = k(a, b, c)$ 。交点 P_b 满足断层拟合的一般方程, 即满足 $ax_1 + by_1 + cz_1 + d = 0$, 则建立式(25)的线性方程组, 求解线性方程组则可得交点 P_b 。

$$\begin{bmatrix} a & b & c & 0 \\ 1 & 0 & 0 & -a \\ 0 & 1 & 0 & -b \\ 0 & 0 & 1 & -c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \\ k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -d \\ x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{bmatrix} \quad (25)$$

根据断层散点 $P_a(x_0, y_0, z_0)$ 、断层拟合 3 维平面的一般方程 $ax + by + cz + d = 0$, 计算散点到平面的距离 d_s 为:

$$d_s = \frac{ax_0 + by_0 + cz_0 + d}{\sqrt{a^2 + b^2 + c^2}} \quad (26)$$

定义断层起伏度(RDFS)是 n 个断层散点到拟合平面距离的平均值, 其数学表达为:

$$P_{RDFS} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n d_{si} \quad (27)$$

式中, d_{si} 为第 i 个散点到平面的距离。

基于断层的反演数据, 由于断层的几何形状是不规则的空间多边形, 难以直接使用一个参数和定义来描述断层的长度, 所以, 通过计算断层散点的最小外接矩形描述断层的长度、宽度和高度。

断层散点的最小外接矩形基于断层的凸边界计算得到, 其基本原理是: 首先, 计算散点的凸包边界; 然后, 建立一个包含 x, y 最大值和最小值的矩形, 通过旋转矩阵使矩形的一条边与 x 轴平行, 该矩形总是与凸边的一条边重合, 可以先得到矩形的面积, 再通过迭代计算找到面积最小的矩形。

断层几何特征分析如图 3 所示。图 3(a) 给出了两种不同边界对断层拟合平面限制。其中: 红色线条为 Alpha Shape 算法得到的非凸边界; 蓝色线条为基于拟合方程所得的数据点, 即格雷厄姆扫描算法得到的凸边界。格雷厄姆扫描算法得到的凸边界的范围要大于 Alpha Shape 算法得到的非凸边界范围, 因此, Alpha Shape 算法得到的边界范围更加符合真实情况。

格雷厄姆扫描算法和 Alpha Shape 算法在不同的断层几何特征分析中均发挥了重要作用。Alpha Shape

算法得到的非凸边界模型能更精准地描述断层的边界特征, 因此, 计算断层周长和面积时推荐使用 Alpha Shape 算法。非凸约束下断层面积(图 3(b))和 Delaunay 三角剖分(图 3(c))可直接运用断层散点数据且不损失任何信息, 从而最大化地利用所有数据来计算断层面积, 应被视作断层面积最准确的描述。断层倾角(起伏度)计算用于反映断层面空间姿态的变化(图 3(d)); 断层长度、宽度、深度和断层外接矩形面积是基于最小外接矩形算法中凸边界计算得到的断层点云在平面上的投影结果, 通过最小外接矩形算法可清晰地确定断层在水平方向上的长度、宽度(图 3(e))。相应的 3 维空间形态用于说明断层在垂向方向上的延伸与整体几何特征(图 3(f)); 结合 2、3 维图的目的是在平面上清晰显示断层外接矩形边界与计算范围, 同时, 在 3 维空间中直观展示断层几何特征的空间分布与起伏关系。因此, 得到断层几何特征总结如表 1 所示。

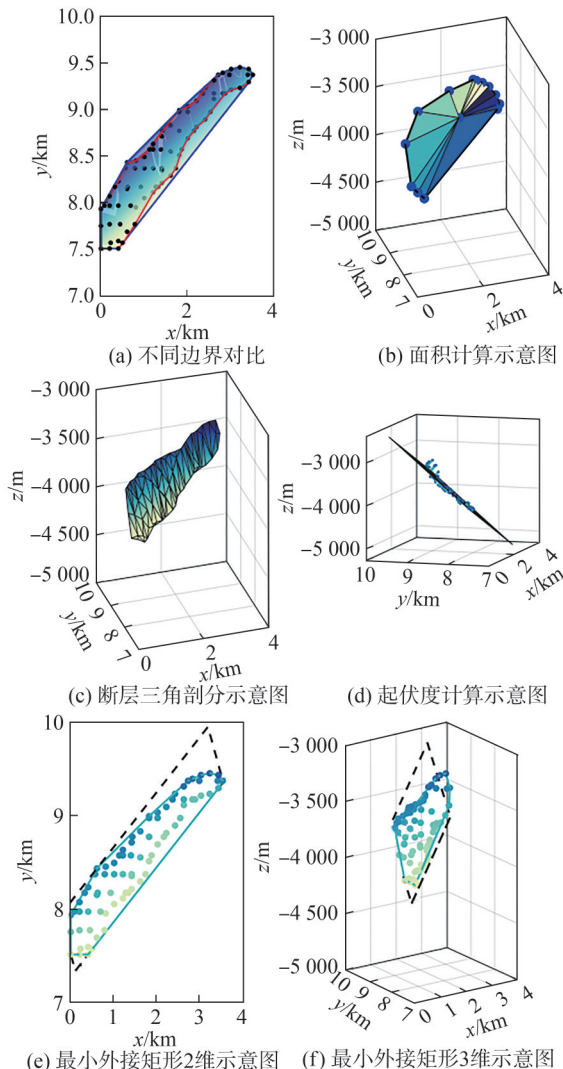


图 3 断层几何特征分析示意图

Fig. 3 Schematic diagram of fault geometry feature analysis

表 1 断层几何特征总结

Tab. 1 Summary of fault geometric features

断层几何性质	模型	算法	数值	备注
断层周长/km	平面断层凸边界	格雷厄姆扫描算法	8.77	
断层周长/km	平面断层非凸边界	Alpha Shape 算法	8.60	推荐
断层面积/km ²	平面断层凸边界	格雷厄姆扫描算法	1.40	
断层面积/km ²	平面断层非凸边界	Alpha Shape 算法	0.93	推荐
断层起伏度/m	断层散点	均值距离	47.13	推荐
断层长度/km	平面断层凸边界	最小外接矩形	3.96	推荐
断层宽度/km	平面断层凸边界	最小外接矩形	0.69	推荐
断层深度/km	平面断层凸边界	最小外接矩形	0.62	推荐
外接矩形面积/km ²	平面断层凸边界	最小外接矩形	3.67	

2 3 维断层精细刻画与几何特征

2.1 川南地区 3 维断层空间分布

针对四川盆地某一页岩气区域,利用 3 维平面断层重构理论、流程和几何特征计算方法,计算该区域的 86 条断层,得到断层分布结果;使用 100×100 的网格矩阵来计算断层,通过 Alpha Shape 算法进行边界限制后得到网格点。图 4 给出了 3 维曲面断层模型及平面断层。

如图 4(a) 所示:不同颜色代表着不同断层,重构得到该区域内最长的断层长度为 42.84 km,最短的断层长度为 0.96 km;断层面积的最大值为 92.51 km²,最

小值为 0.55 km²。根据 3 维平面断层,在断层高度的中部,绘制断层平面与水平平面的交线,即断层的走向线,由于断层是平面模型,故断层走向线为直线,如图 4(b) 所示,箭头所指为断层倾向。根据断层外法线方向,得到断层的倾向方向。观察到断层倾向大致分为两个方向,即北偏西(NW)方向和南偏东(SW)方向。川南地区主要是华蓥山断裂带,该页岩气区域的断裂带主要朝北东方向发育。区域内各断层的分布走向与该区域的主要断裂带的走向相近。

通过拟合系数 R^2 对区域内所有断层拟合效果进行评估,如图 4(c) 所示。拟合系数范围为 $(-\infty, 1]$,拟合效果越好,则拟合系数 R^2 越接近于 1;拟合效果较差,则拟合系数可为负值。由图 4(c) 可知:3 维平面断层的拟合系数平均值为 0.72;断层拟合系数 R^2 的最小值为 0.270 9,对应 29# 断层;断层拟合系数 R^2 的最大值为 0.970 3,对应 47# 断层。拟合效果一方面受到内在因素影响,当断层本身的几何形状为非平面,其表面起伏较明显时,不适合采用平面拟合的方式;另一方面,外在因素也对拟合效果产生影响,例如,断层解释的精度不足、断层数据点的精度较差,都会导致拟合效果较差。

2.2 川南地区断层产状特征分析

根据 3 维平面断层法向量,计算出川南某页岩气开发区断层产状分布,并对该区域内断层产状进行统计分析和正态检验分析。已有研究数据表明,该地区的断层倾向主要集中在 70° 附近^[28]。

高斯分布又被称为正态分布,若某正态分布的均值为 μ , 标准差为 σ , 其概率密度函数为:

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (28)$$

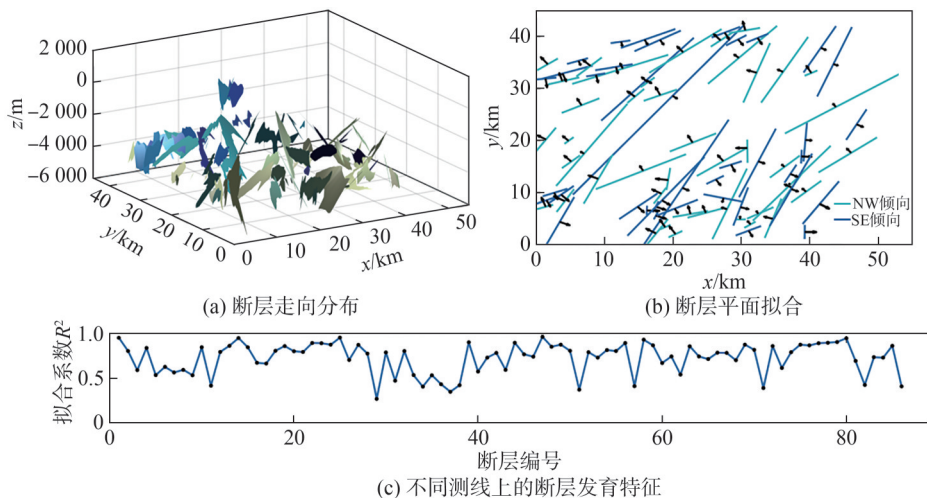


图 4 3 维曲面断层模型及平面断层

Fig. 4 3D surface fault model and planar fault display

使用统计图分析高斯性,往往是依靠分析者的主观判断进行,容易产生结果偏差。因此,需要结合其他方法,常见的高斯性检验有柯尔莫哥洛夫-斯米尔诺夫(Kolmogorov-Smirnov, K-S)检验和夏皮罗-威尔克(Shapiro-Wilk, S-W)检验。K-S检验适用于大样本数据,样本数一般大于50个;S-W检验适用于小样本数

据,样本数一般小于50个。当检验结果的 F 值小于0.05,则认为数据不满足高斯分布。

图5为3维平面断层产状分布。由图5可知,断层倾角和走向呈现高斯分布;断层倾向则以 240° 为分界线,显著分为北西(NW)倾向断层和南东(SE)倾向断层,需要分别进行高斯分布拟合。

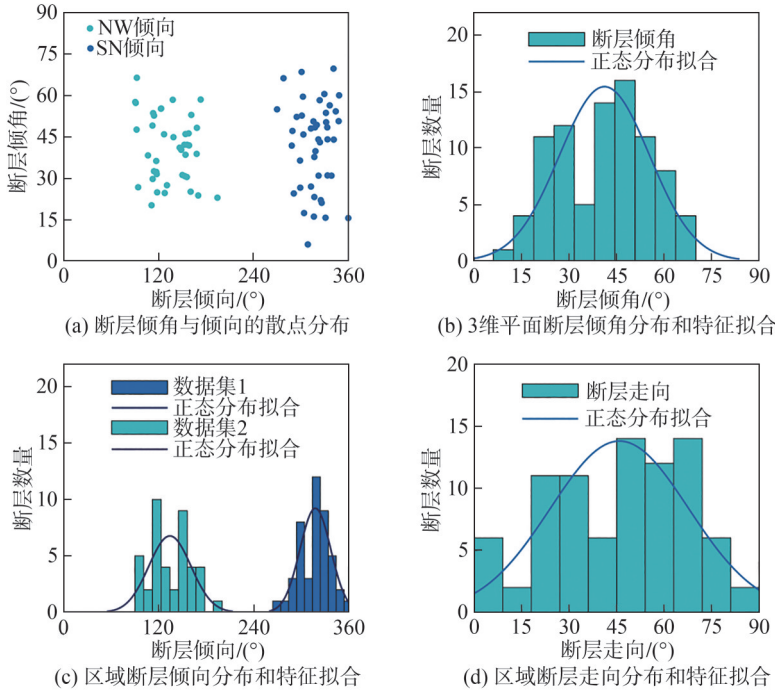


图 5 3维平面断层产状分布

Fig. 5 Distribution of occurrence of 3D planar faults

断层倾角、倾向、走向的分布特征和高斯分布拟合结果如表2所示。

为可视化评估参数分布,图6给出了分位数-分位数图(Q-Q图)。本开发区内含有断层86条,断层倾角个数大于50,因此,应使用K-S检验。断层倾角的K-S检验结果的 F 值为0.5452大于显著性水平0.05(表2),说明断层倾角数据服从高斯分布。由图6(a)可见,断层数据散点近似落在 $y = x$ 线上,即图6中深蓝色直线,说明断层数据分布和高斯分布线性相关。

断层倾向分成两组后,断层倾向数据集1(NW倾向)中含有断层倾向45个,断层倾向数据集2(SE倾向)中含有断层倾向41个,两个数据集中的数据量均小于50,因此,使用S-W检验。断层倾向数据集1的

S-W检验的 F 值为0.8904大于显著性水平0.05(表2),说明断层倾向数据集1服从高斯分布。断层倾向数据集2的S-W检验的 F 值为0.0971大于显著性水平0.05(表2),断层倾向数据集2服从高斯分布。断层倾向数据集1的 F 值大于断层倾向数据集2的 F 值,说明断层倾向数据集1的高斯性好于断层倾向数据集2的高斯性。由图6(b)可见,断层NW倾向的数据散点几乎落在 $y = x$ 线上,说明断层NW倾向数据分布与高斯分布线性相关。由图6(c)可见,断层SE倾向的数据散点的中部落在 $y = x$ 线上,两端略微偏离,说明断层SE倾向的中部数据与高斯分布符合较好,而两端则较差,但从量化的检验来看,仍然属于高斯分布。

表 2 断层倾角、倾向、走向分布特征和拟合系数

Tab. 2 Distribution characteristics of fault dip, dip, strike and fitting coefficients

属性	分布特征	均值/(°)	均值的95%的置信区间	标准差/(°)	标准差的95%的置信区间	F 值
倾角	高斯分布	41.08	[38.03°,44.13°]	14.23	[12.37°,16.74°]	0.525 2(>显著性水平0.05)
北西(NW)倾向	高斯分布	317.73	[311.88°,323.58°]	19.47	[16.12°,24.59°]	0.890 4(>显著性水平0.05)
南东(SE)倾向	高斯分布	134.10	[125.71°,142.48°]	26.58	[21.82°,34.01°]	0.097 1(>显著性水平0.05)
走向	高斯分布	45.85	[41.11°,50.60°]	21.85	[18.98°,25.77°]	0.646 1(>显著性水平0.05)

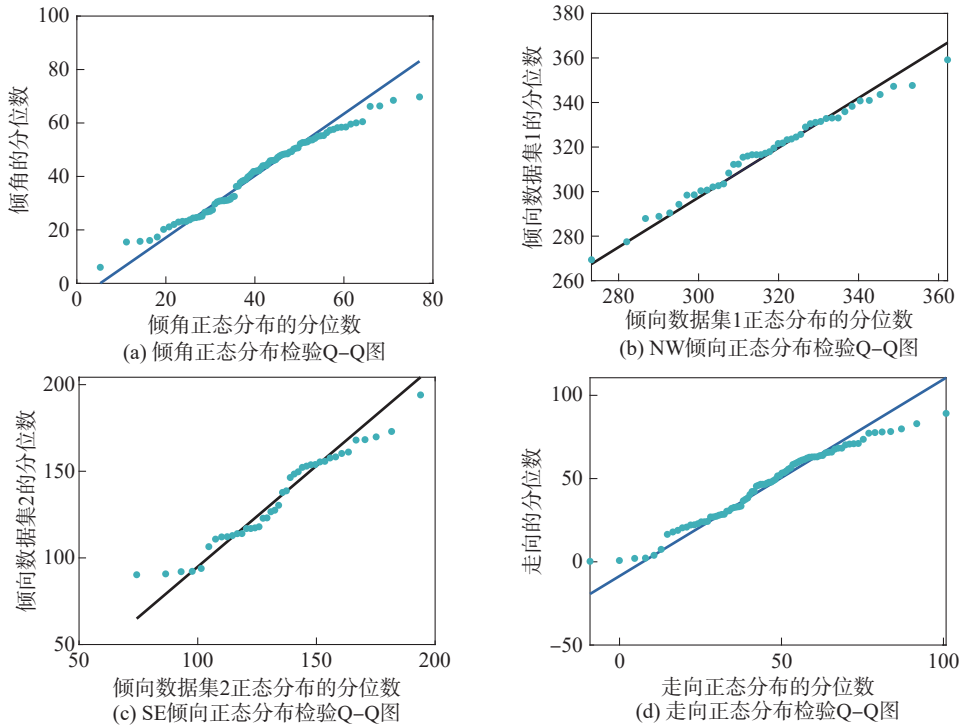


图 6 断层产状正态分布检验 Q-Q 图

Fig. 6 Quantile-quantile plot for normal distribution test of fault occurrence

由于断层走向与断层倾向相差 90°，故将断层走向范围限制为 0~180°。该页岩气区域的断层走向为 0~90° 范围，集中在北东 (NE) 方向，这与所得的走向线 (图 6(d)) 的结果一致。

2.3 川南地区断层几何特征

除了断层产状信息外，断层几何特征也是评价断

层的重要维度。基于 3 维平面断层重构方法计算川南断层几何特征，并对这些几何特征进行统计分析，结果如图 7(a)~(f) 所示。

由图 7 可知：区域内断层长度最大值为 42.84 km；绝大部分断层长度小于 10 km，长度小于 5 km 的断层占比 47%。断层宽度基本都小于 6 km，即倾向方向上的

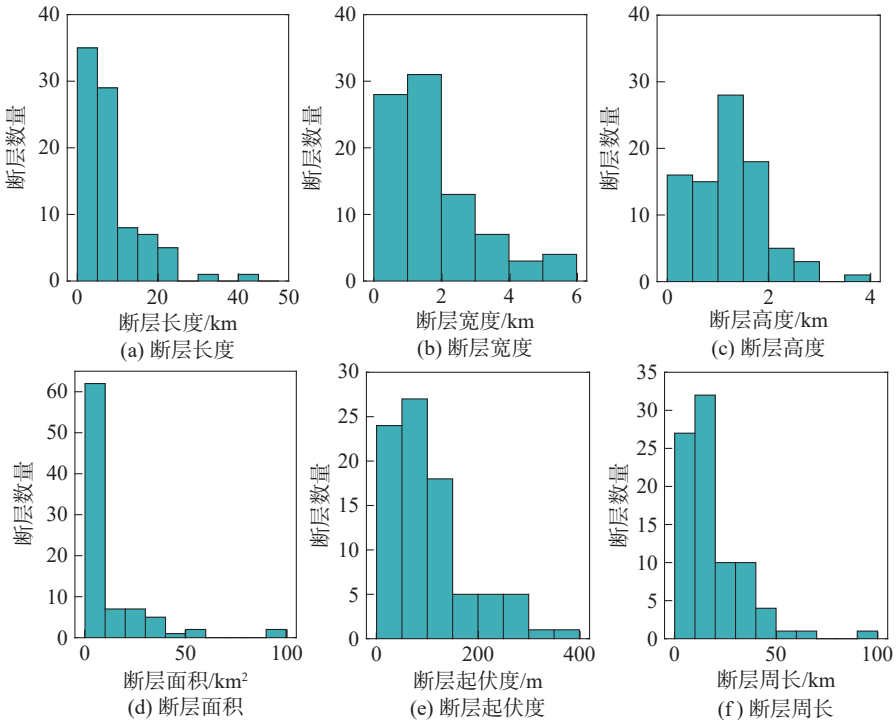


图 7 区域断层几何特征分析结果

Fig. 7 Results of regional fault geometric feature analysis

延伸长度不超过 6 km,而大部分断层宽度集中在 2 km 以内。在垂向上,断层高度延伸小于 4 km;大部分断层的垂向延伸不超过 2 km。绝大部分断层的面积小于 13.34 km²,占比超过 80%。断面面积的分布规律符合长尾分布的特征,即 80% 的断层仅占最大断层面积的 20%,符合二八原则;此外,80% 的断层长度小于 11 km,占最长断层的 26%,也基本符合长尾分布特征。所以,该区域以中小型断层为主,也包含一些大型断层。断层起伏度是评价断层接近平面程度的指标,在川南区域,断层起伏度小于 200 m。断层周长大部分小于 20 km。因此,当前区域内断层起伏度较小的断层值得更多关注和研究。

斯皮尔曼相关系数是描述变量之间具有非线性关系的相关性分析指标。其计算流程如下:

- 1) 排名。将每个变量的数据值进行排序。对于相同的值,可以赋予平均排名。
- 2) 计算差异。计算每对排名之间的差异 e_i ,其中, $e_i=R(X_i)-R(Y_i)$, $R(X_i)$ 和 $R(Y_i)$ 分别为变量 X 和 Y 的排名。
- 3) 平方差。计算每个差异的平方 e_i^2 。
- 4) 求和。将所有的平方差求和,得到 $E=\sum_i e_i^2$ 。
- 5) 计算斯皮尔曼(Spearman)相关系数:

$$\rho = 1 - \frac{6E}{m(m^2 - 1)} \quad (29)$$

当 Spearman 相关系数等于 1 时,表示两个变量之间存在完全单调正相关;当 Spearman 相关系数等于 -1 时,表示两个变量之间存在完全单调的负相关;当 Spearman 相关系数等于 0 时,表示两个变量之间不存在相关关系。一般来说,当 Spearman 相关系数绝对值位于 (0,0.3) 区间时,变量间有弱相关性;其在 [0.3,0.7) 区间时,表示变量间有中等相关性;其在 [0.7,1.0] 之间,表示变量间有强相关性。

基于 Spearman 相关系数,分析断层产状和断层几

何特征的相关性,计算结果如图 8 所示。

由图 8 可知:断层倾角与断层宽度的负相关性最强,断层倾角与断层长度、面积等其他指标也呈负相关。这表明随着断层几何尺度增加,断层的倾角会越小,即断层更平缓。断层倾角与垂向高度呈弱正相关,意味着断层纵向延伸越长,断层的倾角越大。断层倾角与断层倾向之间的 Spearman 相关性系数约为 -0.02,接近于 0,即断层倾角与断层倾向之间没有直接关系。断层倾向与断层几何特征之间的 Spearman 相关性系数的绝对值小于 0.3,表明断层倾向与几何特征之间没有直接关系。

断层长度、宽度、垂向高度、面积、周长都是描述断层几何尺度的参数,由于这些参数之间本身就有联动性,故它们之间有显著的正相关性。值得注意的是,断层的纵向延伸,即垂向高度与其他参数的 Spearman 相关性系数较小,意味着断层纵向延伸与长度、宽度相关性较弱,则断层易在水平面发育,而难于纵向发育及向上扩展。

断层的起伏度与断层倾角有中等程度的负相关性,即高角度断层的起伏度越小,断层越接近平面状态,且越光滑。断层的起伏度与断层几何尺度特征参数(如长度、高度等)呈现显著正相关,表明断层几何尺度越大,断层越弯曲起伏,且越粗糙。综合分析产状、几何尺度和起伏度的 Spearman 相关性系数可知,断层的几何尺度越大,断层的倾角越小且平缓,断层越弯曲起伏;相反地,断层几何尺度越小,断层倾角越高且陡峭,断层越光滑。这可能与断层构造变形特征有关。川南断层经历了多期复合构造,联合叠加构造作用,形成了多组多向和复杂构造的变形。

在页岩气开发实践过程中,张伟等^[29]通过数值模拟指出断层表面越粗糙,断层越难以滑动;断层滑移量和套管位移量都略微减小。大尺度断层通常会影响到较大范围的地层,断层活动引起的地层应力场变化范围更广。当断层滑移或活动时,可能导致周围岩层的



图 8 斯皮尔曼相关性系数
Fig. 8 Spearman correlation coefficients

应力重分布,使在套管上施加更大的弯曲应力或剪切力;同时,断层规模越大,周围岩体对其约束力越小,越易发生断层滑移现象。起伏度较高的断层通常伴随较复杂的地质应力场,其不规则的形态在断层活动时会造成非均匀的应力施加,导致套管变形模式复杂,易形成扭曲、弯曲和不均匀的变形^[30]。在靠近这些大尺度断层的建井过程中,需要考虑使用大壁厚套管增强力学性能。

2.4 川南地区重要断层及其几何特征

图9给出某页岩气开发区域断层几何特征分析。图9中,在该区域中部呈淡绿色的区域是川南某页岩气开发区,箭头所指为断层倾向,不同颜色代表的倾向组别、断层编号。在该页岩气开发区附近存在4条重要的断层(编号为5#、9#、15#和33#),由于断层位于页岩气储层周围,断层几何特征变化较大,同时在页岩气开发过程中断层将受到一定的影响,因此,应对这4条断层进行分析。由图9(a)可知,33#断层倾向南偏东方向,即SE方向;而5#、9#、15#断层倾向北偏西方向,即NW方向。这与区域断层的倾向特征相符。在4条断层的包围下,区域中部没有其他较大的断层。因此,该区域内部没有与外界沟通的大型通道,对于页岩气的保存、储集是有利的。

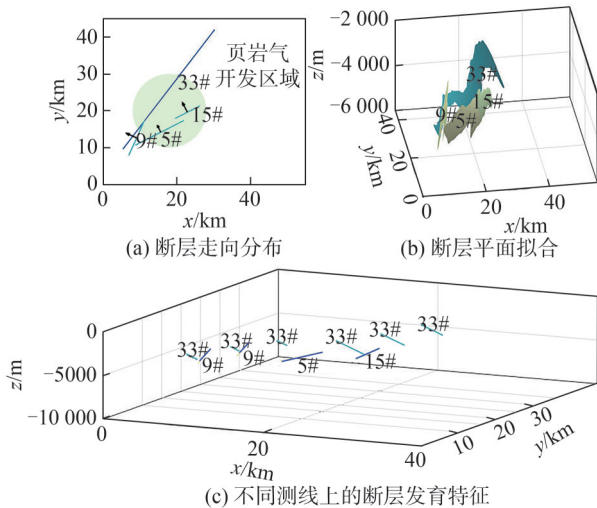


图9 某页岩气开发区域断层几何特征分析

Fig. 9 Geometric feature analysis of faults in a shale gas development area

区域重要断层(编号为5#、9#、15#和33#)的几何特征分析,如图10(a)~(f)所示。由图10可知:在长度方面,33#断层长度最长,达到42.84 km,33#断层是华蓥山断裂带在该区域的主要分支,其余3条断层长度稍短。断层的垂直高度在1.5~3.0 km范围内,即从龙马溪组底到二叠系茅口组。其中,9#断层的垂向高度最大,由底部到上部延展最长。33#断层的面积为91.22 km²,5#断层面积次之,而9#、15#断层面积较小。

33#断层的起伏度最大,达到了287 m;15#断层的起伏度最小,只有83 m,意味着该断层最为接近平面断层。33#断层周长最大。

根据第2.3节 Spearman 相关性分析可知,断层起伏度与长度之间的相关性达到了0.87,具有强正相关性,33#断层的长度最大,其起伏度参数也应最大,但是,33#断层的起伏度并非显著大于其他3条断层,这体现了断层几何特征之间的非线性关系。

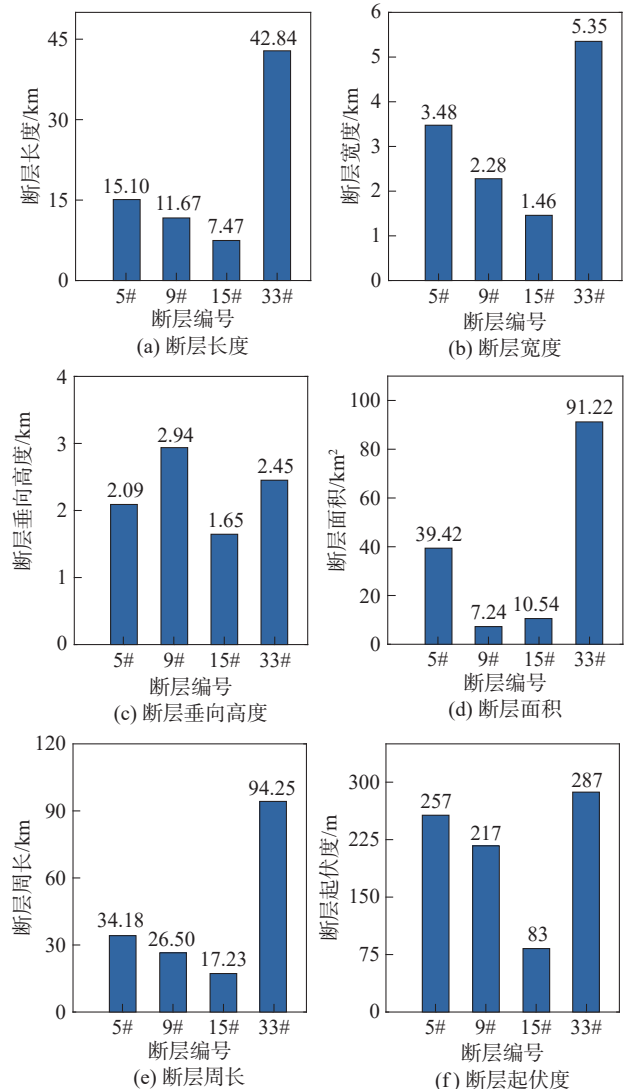


图10 区域重要断层几何特征分析

Fig. 10 Geometric feature analysis of key faults in the region

3 讨论

3维平面断层重构方法主要是基于3维地震解释的散点数据,先利用奇异值分解算法得到断层平面方程参数,再利用Alpha Shape算法得到断层的真实边界,最后,利用网格控制点代入平面方程得到3维平面断层空间分布。3维平面断层重构方法的优势在

于离散断层被简化为平面形态下但仍具有真实边界的断层系统。其几何特征是基于平面断层模型得到的。

平面断层重构及几何特征的准确性、可靠性可以分情况分析:一是,如果实际断层本身的几何形状就接近平面断层,3维地震解释却带来了较大的空间坐标误差,那么,3维平面断层重构算法就是对断层本身的还原,3维平面断层重构算法可以纠正误差来源;二是,如果实际断层本身具有一定的弯曲,使用3维平面重构算法后,真实的断层几何特征的上下界限值被忽视,这是3维平面断层重构算法未能考虑的,即在极限情况未能被真实建模。然而,3维平面断层重构算法得到的是实际断层弯曲情况的平均值,断层几何特征仍然具有代表性。

4 结 论

本文建立了基于奇异值分解的断层3维平面重构方法,有效揭示了断层的几何特征,刻画了断层空间分布规律,该方法可推广至其他区域。

在川南某页岩气地区,共发育了86条断层,主要分为两组,一组倾向于南偏东(SE)方向,另一组倾向于北偏西(NW)方向;这些断层主要为中低角度断层,高角度断层较少。在邻近页岩气开发区域的4条大型断层中,断层从页岩底部滑脱层平缓发育,穿过储层后断层倾角逐渐增大,高角度发育至二叠系茅口组。

断层的几何尺度越大,断层的倾角越小且平缓,断层越弯曲起伏;相反地,断层几何尺度越小,断层倾角越高且陡峭,断层越光滑。就断层几何特征而言,区域内断层最长可达42.84 km,大部分断层的长度小于10 km。断层长度和面积分布满足幂律长尾分布特征。在垂直方向,断层一般延伸约2 km;横向延伸一般为2 km,最长延伸可达5 km。这种长尾分布模式反映了断层的自相似性和多尺度特性。

本文的平面断层重构结果既有助于页岩气水平井工艺优化,也有助于更清楚地了解和认识断层滑移及地壳变形运动机制,并且,对预测未来的断层活动及其发展趋势具有重要意义,有助于理解断层在不同尺度上的发育规律。

参考文献:

[1] Ma Xinhua, Wang Hongyan, Zhou Shangwen, et al. Deep shale gas in China: Geological characteristics and development strategies[J]. Energy Reports, 2021, 7: 1903–1914.

[2] Luo Tao, Guo Xiaowen, He Zhiliang, et al. Fluid evolution and gas enrichment in the Wufeng–Longmaxi shale reservoirs of the eastern Sichuan Basin, SW China[J]. Journal of

Asian Earth Sciences, 2024, 259: 105905.

- [3] Chen Gengsheng, Wu Jianfa, Liu Yong, et al. Geology-engineering integration key technologies for ten billion cubic meters of shale gas productivity construction in the Southern Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2021, 41(1): 72–82. [陈更生, 吴建发, 刘勇, 等. 川南地区百亿立方米页岩气产能建设地质工程一体化关键技术[J]. 天然气工业, 2021, 41(1): 72–82.]
- [4] Chang Cheng, Tao Shiping, Wang Xingchen, et al. Post-frac evaluation of deep shale gas wells based on a new geology-engineering integrated workflow[J]. Geoenergy Science and Engineering, 2023, 231: 212228.
- [5] Jiang Zhenxue, Liang Zhikai, Shen Yinghao, et al. Coupling key factors of shale gas sweet spot and research direction of geology-engineering integration in southern Sichuan[J]. Earth Science, 2023, 48(1): 110–129. [姜振学, 梁志凯, 申颖浩, 等. 川南泸州地区页岩气甜点地质工程一体化关键要素耦合关系及攻关方向[J]. 地球科学, 2023, 48(1): 110–129.]
- [6] Xiao Dazhi, Fang Xiaoyu, Huan Jinlai, et al. Rapid establishment method of complex fault block structural model[J]. Journal of Hebei GEO University, 2021, 44(3): 59–63. [肖大志, 方小宇, 郝金来, 等. 复杂断块构造模型快速建立方法[J]. 河北地质大学学报, 2021, 44(3): 59–63.]
- [7] Zhou Yanping, Zhang Min, Zhang Jinjin. 3D geological modeling of Taiyuan active fault surveying based on GIS[J]. Mineral Exploration, 2019, 10(4): 984–989. [周艳萍, 张敏, 张瑾瑾. 基于GIS的太原市活断层三维建模[J]. 矿产勘查, 2019, 10(4): 984–989.]
- [8] Niu Lujia, Wang Shuangwei, Zeng Yiwen, et al. Processing and modeling of complex fault networks based on regular grid[J]. Geological Review, 2023, 69(5): 1980–1990. [牛露佳, 王双威, 曾义文, 等. 基于规则网格的复杂断层网络处理与建模[J]. 地质论评, 2023, 69(5): 1980–1990.]
- [9] Hou Xiaolin, Qiang Weifan. The key algorithms research of 3D complex fault modeling[J]. Computer Applications and Software, 2023, 40(10): 120–129. [侯晓琳, 强伟帆. 三维复杂断层建模关键算法研究[J]. 计算机应用与软件, 2023, 40(10): 120–129.]
- [10] Zou Yanhong, Li Gaozhi, Mao Xiancheng, et al. Three-dimensional fault-network modeling and uncertainty analysis based on implicit function surface[J]. Geological Review, 2020, 66(5): 1349–1360. [邹艳红, 李高智, 毛先成, 等. 基于隐函数曲面的三维断层网络建模与不确定性分析[J]. 地质论评, 2020, 66(5): 1349–1360.]
- [11] 周诗雨, 蒋波, 李金芝, 等. 四川盆地南缘断裂系统及对页岩气保存效果影响[C]. ECF国际页岩气论坛2021第十一届亚太页岩油气暨非常规能源峰会, 上海, 2021: 7.

- [12] Guo Weixing, Tang Jianming, Ouyang Jiasui, et al. Characteristics of structural deformation in the southern Sichuan Basin and its relationship with the storage condition of shale gas[J]. *Natural Gas Industry*, 2021, 41(5): 11–19. [郭卫星, 唐建明, 欧阳嘉穗, 等. 四川盆地南部构造变形特征及其与页岩气保存条件的关系[J]. *天然气工业*, 2021, 41(5): 11–19.]
- [13] 王新岚, 梁虹, 朱亚东, 等. 川中-川南走滑断裂展布特征及与油气成藏关系[C]. 中国石油学会 2021 年物探技术研讨会, 成都, 2021: 964–967.
- [14] Xu Menglong, Yang Yabin, Sun Chengye, et al. Geophysical characterisation and oil-gas resource analysis of the southern Huaying Mountain fault zone, Sichuan basin, China[J]. *Minerals*, 2023, 13(2): 270.
- [15] Shi Yuguang, Tang Xianglu, Wu Wei, et al. Control of complex structural deformation and fractures on shale gas enrichment in southern Sichuan Basin, China[J]. *Energy & Fuels*, 2022, 36(12): 6229–6242.
- [16] Fan Cunhui, Xie Hubin, Li Hu, et al. Complicated fault characterization and its influence on shale gas preservation in the southern margin of the Sichuan Basin, China[J]. *Lithosphere*, 2022, 2022(Special 12): 8035106.
- [17] Wang Huaimin, Fan Cunhui, Fang Yi, et al. Structural analysis and evolution model of the Longmaxi Formation in the Yanjin–Junlian area of the southern Sichuan Basin, China[J]. *Frontiers in Earth Science*, 2022, 10: 884971.
- [18] Xie Weidong, Chen Si, Gan Huajun, et al. Preservation conditions and potential evaluation of the Longmaxi shale gas reservoir in the Changning area, southern Sichuan Basin[J]. *Geoscience Letters*, 2023, 10(1): 36.
- [19] Han Lingling, Li Xizhe, Guo Wei, et al. Characteristics and dominant factors for natural fractures in deep shale gas reservoirs: A case study of the Wufeng–Longmaxi Formations in Luzhou Block, Southern China[J]. *Lithosphere*, 2022, 2022: 9662175.
- [20] Yang Jinhe, He Dengfa, Zhang Weikang, et al. Three-dimensional geometry and kinematics of the Changning anticline in the southern Sichuan Basin[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2022, 96(4): 1432–1450.
- [21] Shi Xuewen, Wu Wei, Shi Yuguang, et al. Influence of multi-period tectonic movement and faults on shale gas enrichment in Luzhou area of Sichuan Basin, China[J]. *Energies*, 2022, 15(18): 6846.
- [22] He Shun, Qin Qirong, Li Hu, et al. Deformation differences in complex structural areas in the southern Sichuan Basin and its influence on shale gas preservation: A case study of Changning and Luzhou areas[J]. *Frontiers in Earth Science*, 2022, 9: 818534.
- [23] Wen Ran, Heng De, Chen Wei, et al. Characteristics of tectonic deformation in Changning area of southern Sichuan and its relationship with preservation conditions of Shale gas[J]. *Petrochemical Industry Technology*, 2023, 30(8): 83–85. [文冉, 衡德, 陈伟, 等. 川南长宁地区构造变形特征及其与页岩气保存条件关系[J]. *石化技术*, 2023, 30(8): 83–85.]
- [24] Wu Jianfa, Zhang Chenglin, Zhao Shengxian, et al. Typical types of shale gas reservoirs in southern Sichuan Basin and enlightenment of exploration and development[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2023, 34(8): 1385–1400. [吴建发, 张成林, 赵圣贤, 等. 川南地区典型页岩气藏类型及勘探开发启示[J]. *天然气地球科学*, 2023, 34(8): 1385–1400.]
- [25] Zhao Shengxian, Zheng Majia, Liu Shaojun, et al. Multi-scale fractures and their influence on shale gas deliverability in the Longmaxi Formation of the Changning Block, southern Sichuan Basin, China[J]. *ACS Omega*, 2023, 8(20): 17653–17666.
- [26] Han Lingling, Li Xizhe, Liu Zhaoyi, et al. Influencing factors and prevention measures of casing deformation in deep shale gas wells in Luzhou block, southern Sichuan Basin, SW China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2023, 50(4): 853–861. [韩玲玲, 李熙喆, 刘照义, 等. 川南泸州深层页岩气井套变主控因素与防控对策[J]. *石油勘探与开发*, 2023, 50(4): 853–861.]
- [27] Li Jiajie, Qin Qirong, Li Hu, et al. Numerical simulation of the Palaeotectonic stress field and prediction of the natural fracture distribution in shale gas reservoirs: A case study in the Longmaxi Formation of the Luzhou area, southern Sichuan Basin, China[J]. *Geological Journal*, 2023, 58(11): 4165–4180.
- [28] Li Jing, Li Hu, Xu Jianliang, et al. Effects of fracture formation stage on shale gas preservation conditions and enrichment in complex structural areas in the southern Sichuan Basin, China[J]. *Frontiers in Earth Science*, 2022, 10: 921988.
- [29] Zhang Wei, Li Jun, Zhang Hui, et al. Influence of fault slip on casing shear deformation and its prevention and control measures[J]. *Fault-Block Oil and Gas Field*, 2023, 30(5): 734–742. [张伟, 李军, 张慧, 等. 断层滑移对套管剪切变形的影响规律及防控措施[J]. *断块油气田*, 2023, 30(5): 734–742.]
- [30] Yan Wei, Wang Kongyang, Deng Jingen, et al. Analysis on the deformation characteristics of casing caused by fault slip—a case study of Dagang Guandong shale oil[J]. *Petroleum Science Bulletin*, 2022, 7(4): 543–554. [闫伟, 王孔阳, 邓金根, 等. 断层错动型套管变形特征分析——以大港官东页岩油为例[J]. *石油科学通报*, 2022, 7(4): 543–554.]

Three-dimensional Plane Fault Reconstruction and Geometric Feature of Shale Reservoirs Faults

GAO Leiyu¹, SHI Xiangchao^{1*}, FAN Cunhui², JIA Xiwen¹, YU Xingchuan¹, ZHANG Hao¹, ZHANG Qin¹

(1.National Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China;

2.College of Earth Science and Technology, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China)

Abstract:

Objective The three-dimensional refinement and characterization of faults in shale reservoirs are closely associated with the investigation of shale reservoir accumulation and preservation conditions and play a critical role in revealing the mechanisms governing engineering casing deformation.

Methods This study presented a method for precise fault geometric characterization through fine-scale reconstruction and analysis of fault data points, with the following key components: 1) fault plane equation fitting using singular value decomposition (SVD), which was evaluated by the R-squared coefficient of determination; 2) geometric parameter calculations, including fault dip angle, dip direction, and relief degree (RDFS), which was defined as the average distance from scattered points to the fitted plane; 3) boundary determination through the Graham scan and Alpha Shape algorithms for convex and non-convex boundaries, respectively, with the Alpha Shape algorithm being recommended for more precise boundary delineation; 4) dimensional characterization using minimum bounding rectangles to quantify fault length, width, and height. The integrated methodology enabled comprehensive geometric analysis of 3D fault surfaces and provided robust technical support for shale gas exploration and development in the southern Sichuan Basin.

Results and discussions In the shale gas development area of the southern Sichuan Basin, a total of 86 faults were identified and were primarily categorized into two dominant groups, with one set dipping southeast (SE) and the other northwest (NW). These faults predominantly exhibited moderate-to-low dip angles, while high-angle faults were relatively scarce. Four major faults adjacent to shale gas production zones demonstrated distinct geometric evolution, as they initiated from gently dipping detachment layers at the shale base, traversed through reservoir formations with progressively increasing dip angles, and ultimately developed steeply dipping segments within the Permian Maokou Formation. The geometric characteristics revealed an inverse correlation between fault scale and dip angle. Larger-scale faults typically displayed gentler dips with lower angles and greater curvature, whereas smaller-scale faults tended to exhibit steeper dips with higher angles and smoother geometries. Regional fault lengths reached up to 42.84 km, although most measured less than 10 km. Both fault length and fault area distributions followed power-law patterns with long-tail characteristics. Vertically, faults generally extended approximately 2 km, while horizontal spans ranged from a typical 2 km to a maximum of 5 km. This distribution pattern reflected the self-similarity and multi-scale characteristics of fault systems and indicated scale-invariant growth mechanisms during tectonic deformation. The observed geometric relationships provided critical constraints for understanding fault connectivity and fluid migration pathways in shale reservoirs.

Conclusions The reconstruction results of the planar fault are beneficial for optimizing horizontal well technology in shale gas operations. These results also contribute to a clearer understanding of fault slip behavior and the mechanisms of crustal deformation and are significant for predicting future fault activity and its developmental trends. In addition, the findings support an improved understanding of fault development patterns across different spatial scales.

Key words: southern Sichuan shale gas; fault distribution; fault reconstruction; geometric characteristics; plane faults

(编辑 赵 婧)

引用格式: Gao Leiyu, Shi Xiangchao, Fan Cunhui, et al. Three-dimensional plane fault reconstruction and geometric feature of shale reservoirs faults[J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2026, 58(1): 355–367. [高雷雨, 石祥超, 范存辉, 等. 页岩储层3维平面断层重构及几何特征描述[J]. *工程科学与技术*, 2026, 58(1): 355–367.]