2026 年第 41 卷 第 5 期
2026,41(5):2092-2102
地球物理学进展 Progress in Geophysics
http://www.progeophys.cn
ISSN 1004-2903
CN 11-2982/P

常健强,朱博华,冯雅颂,等.2026.基于奇异向量相似性约束的 SVD 缝洞体地震响应分离方法.地球物理学进展,41(5):2092-2102,doi:10.6038/pg2026JJ0419.

CHANG JianQiang, ZHU BoHua, FENG YaSong, *et al*. 2026. Singular vector similarity-constrained SVD method for seismic response separation in fracture-cavity bodies. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 41(5):2092-2102,doi:10.6038/pg2026JJ0419.

基于奇异向量相似性约束的 SVD 缝洞体地震响应分离方法

Singular vector similarity-constrained SVD method for seismic response separation in fracture-cavity bodies

常健强[1],朱博华[1,2,3*],冯雅颂[4],杨柳鑫[1],赵军[1],李飞[1]

CHANG JianQiang[1], ZHU BoHua[1,2,3*], FENG YaSong[4], YANG LiuXin[1], ZHAO Jun[1], LI Fei[1]

1. 中石化石油物探技术研究院有限公司,南京 211103
2. 同济大学海洋与地球科学学院,上海 200092
3. 中国石化王仰华院士工作站,南京 211103
4. 中国石油大学(华东)地球科学与技术学院,山东青岛 266580

1. *Sinopec Geophysical Research Institute Co., Ltd., NanJing* 211103, *China*
2. *School of Ocean and Earth Science, Tongji University, Shanghai* 200092, *China*
3. *SINOPEC Yanghua Wang Academician Workstation, Nanjing* 211103, *China*
4. *School of Geosciences, China University of Petroleum, Qingdao Shandong* 266580, *China*

摘 要 塔里木盆地深层发育的小尺度碳酸盐缝洞储集体,具有典型的非均质“串珠状”地震响应特征,但其储层识别与空间刻画精度易受到背景地层反射影响.因此,本文在常规奇异值分解 SVD 提取缝洞体地震响应的基础上,针对其迭代选取截断奇异值带来的不确定性等问题,利用动态时间规整 DTW 算法对右奇异向量进行相似性评价,并结合能量比约束,构建可分离缝洞体地震响应及同步去噪的滤波算子,提出了一种基于奇异向量相似性约束的 SVD 缝洞体地震响应分离方法.经理论模型及实际地震数据测试、验证,认为:右奇异向量之间 DTW 相似距离”拐点”处对应的截断奇异值,可以有效分离背景地层反射与缝洞体地震响应;本方法分离后的缝洞体地震响应特征进一步凸显,背景地层反射及随机噪声被明显压制,串珠弱信号有效增强,这对后续开展地震相识别、储层预测等工作具有重要意义.

Abstract The small-scale carbonate fracture-cavity reservoirs developed in the deep Tarim Basin exhibit a typical heterogeneous “beaded” seismic response signature, but the accuracy of their reservoir identification and spatial delineation is susceptible to interference from background seismic reflections of surrounding strata. Therefore, building upon conventional SVD for extracting fracture-cavity reservoir responses, this study addresses uncertainties in iterative selection of truncated singular values. We develop a filtering operator through DTW-based similarity constraint of right singular vectors. With energy-ratio constraints, enabling simultaneous seismic response separation and denoising. This establishes a novel singular vector similarity-constrained SVD method. Based on testing and validation with both synthetic and actual seismic data, it is found that the truncated singular value corresponding to the “inflection point” in the DTW similarity distance between right singular vectors, which can effectively distinguish background formation reflections

收稿日期 2025-12-09; **修回日期** 2026-04-05. **投稿网址** http://www.progeophys.cn

基金项目 中国石化科技攻关项目“断控储集体缝洞精细预测及断裂表征技术研究”(P25012)资助.

第一作者简介 常健强,男,1996 年生,硕士,工程师,现主要从事地震综合解释和储层预测. E-mail:changjq.swty@sinopec.com

***通讯作者** 朱博华,男,1987 年生,硕士,高级工程师,现主要从事地震资料解释方法研究. E-mail:zhubh.swty@sinopec.com

关键词 缝洞储集体;SVD;奇异向量相似性约束;能量比约束;DTW

中图分类号 P631

文献标识码 A

doi:10.6038/pg2026JJ0419

CSTR:32085.14.pg2026JJ0419

from seismic responses of fractured-cavity bodies. This method further highlights seismic responses of fracture-cavity bodies while significantly suppressing background reflections and random noise. The enhanced beaded weak signals provide critical support for subsequent seismic facies identification and reservoir prediction.

Keywords Fracture-cavity reservoirs; SVD; Similarity constraint of singular vector; Energy-ratio constraint; DTW

0 引 言

随着勘探开发进程不断深入,我国油气资源勘探目标逐渐转向深层、超深层、非常规等复杂油气藏,其中,深层-超深层断控缝洞型油气藏已成为塔里木盆地重要的油气勘探领域(马永生等,2024;何治亮等,2023),缝洞储集体具有尺度小,强非均质性等特点,在地震剖面上具有“串珠状”、“强能量”的地震响应(朱博华等,2024;张滨鑫等,2024;吕丙南等,2024).然而,由于层状背景地震反射影响,会使相应的能量属性、地震反演结果等产生“平层、板状”现象,从而对缝洞储集体的识别与空间刻画、地震相描述、储量估算等方面造成影响.因此,如何分离并提取缝洞体地震响应特征、凸显储层弱信号,对于深层碳酸盐岩缝洞储集体识别、储层预测具有重要意义.

奇异值分解(Singular Value Decomposition,SVD)作为信号处理领域中一种强大的矩阵分析工具,因其高效性、便捷性,地震数据处理领域得到了广泛而深入的应用,如地震去噪、波场分离、绕射波成像、数据融合等领域.在地震去噪方面,Bekara 和 Van der Baan(2007)将 f-x 反褶积、中值滤波与局部 SVD 结合使用,较好地抑制了背景噪声;Oropeza 和 Sacchi(2011)基于奇异谱分析有效压制地震数据随机噪声;沈鸿雁(2012)、沈鸿雁和李庆春(2012)、高磊等(2023)通过联合多域的奇异值分解,实现地震波场的分离与去噪处理.Kreimer 和 Sacchi(2012)基于高阶奇异值分解算法,提出了一种叠前数据四维重建和去噪方法;Porsani 等(2013)与 Gan 等(2015)考虑构造影响,分别提出了倾角自适应、构造导向的奇异值分解地震去噪方法;马继涛等(2016)基于频率域 SVD 矩阵降秩运算实现了地震数据去噪与插值的同步处理.Siahsar 等(2017)利用随机矩阵最优低秩估计理论,提出了一种基于最优奇异值收缩的三维地震数据同时去噪与插值方法;姜弢等(2017)、李江(2019)改进了角度域地震去噪方法;胡永泉等(2019)与王程和王维红(2020)分别在 SVD 的基础上,结合振幅比、特征值下降比等信息,有效压制了微地震中的噪声干扰.Liu 和 Liu(2020)提出了一种基于频率域滤波的 SVD 随机噪声去除方法;马小军和吴庆举(2020)采用滑动窗加权 SVD 方法实现了背景噪声互相关波形去噪.董烈乾等(2021)则提出了基于 SVD 约束迭代反演的混叠噪声压制方法;胡海鹏等(2025)将 PCA 与 K-SVD 相结合高效实现了地震数据去噪;刘浩运等(2025)基于广义 S 变换奇异值谱分析,可同时实现保护断层与去除噪声.在波场分离及特征提取方面,高磊等(2013)通过极大化相关性算法实现排齐同相轴,提出一种基于两步 SVD 变换的零偏 VSP 资料上下行波场分离方法.王蓉蓉等(2015)将 SVD 与 Parsimony 准则结合构建了强抗噪的时变子波提取评价准则.魏巍等(2020)等利用 SVD 算法分离绕射波并实现了绕射波成像.陈勐韬等(2020)通过引入权重矩阵,提出了一种基于 SVD 的二维空间数据融合方法.张银涛等(2024)采用 SVD 方法有效提取了深层缝洞体的地震特征.

本文在常规 SVD 缝洞地震特征提取方法的基础上(张银涛等,2024),针对迭代选取截断奇异值带来的不确定性、效率低等问题,提出了一种基于奇异向量相似性约束的 SVD 缝洞体地震特征分离方法.本文首先介绍了 SVD 方法原理,接着,对与输入地震数据特征相关的奇异向量,进行动态时间规整(Dynamic Time Warping,DTW)相似性评价,相较传统方法,本方法可有效提高截断奇异值选择准则的客观性和可解释性;并结合能量比约束,构建了可分离缝洞体地震响应及同步去噪的滤波算子,从而提出基于奇异向量相似性约束的 SVD 缝洞体地震响应分离方法.最后,利用理论模型正演地震数据与实际地震资料,对本方法的可行性、有效性进行了合理验证.

1 方法原理

1.1 奇异值分解与重构

设叠后地震数据为一个 n 行 m 列的矩阵 $\boldsymbol{A}$,m 为地震道数,n 为采样点,则利用 SVD 可以分解为以下形式(Bekara and Van der Baan,2007):

$$\boldsymbol{A} = \boldsymbol{U}\boldsymbol{\Sigma}\boldsymbol{V}^{\mathrm{T}} = \sum_{i=1}^{i=m} \boldsymbol{u}_i \sigma_i \boldsymbol{v}_i^{\mathrm{T}}, \tag{1}$$

式中,$\boldsymbol{U}$ 为左奇异向量矩阵,是一个 $m \times m$ 的正交矩阵,其列向量为左奇异向量;$\boldsymbol{V}$ 为右奇异向量矩阵,是一个 $n \times n$ 的正交矩阵,其列向量为右奇异向量,$\boldsymbol{u}_i \cdot \boldsymbol{v}_i^{\mathrm{T}} \sigma_i$ 称为 $\boldsymbol{A}$ 的第 i 个特征图像;$\boldsymbol{\Sigma}$ 为奇异值矩阵,是一个 $m \times n$ 的对角矩阵,其非对角线元素均为零,对角线元素为奇异值,为从大到小排列的非负实数($\sigma_1 \geqslant \sigma_2 \geqslant \cdots \geqslant \sigma_n$).

奇异值分解可以解释为:矩阵 $\boldsymbol{A}$ 由一组按重要性排序的特征图像叠加而成,其中每个特征图像的权重由其奇异值大小决定,奇异值则反映了矩阵 $\boldsymbol{A}$ 中相干信号分量的能量强弱. 对于含有缝洞体的地震数据来说,背景层状地震反射的相干性较强,多集中在大奇异值的特征图像中(高磊等,2013);而缝洞储集体具有尺度小,非均质等特点,在地震剖面上具有“串珠状”、“强能量”、“相干性弱”的地震响应,其特征分量多集中在奇异值居中的特征图像中;同时,随机噪声具有的随机分布、弱能量特征,其相干性弱,存在较小奇异值的特征图像中.

因此,可设计一奇异值滤波器,来分离、提取表征不同特征的地震数据,常见的滤波器有(张银涛等, 2024):压制随机噪声的“低通滤波器”,去除强相干噪声的“高通滤波器”,以及分离特征信号的“带通滤波器. 本文基于缝洞体具有的非均质性特点,通过设计合理的 SVD“带通滤波器”来实现对缝洞体地震响应的重构及分离、提取,其主要步骤如下:

(1)奇异值分解

在输入叠后地震数据体后(可先层拉平),取地震数据子体矩阵 $\boldsymbol{Sc}$,$m \times n \times k$,其横向尺寸可设为缝洞体范围的 3 ~ 5 倍左右;之后对三维矩阵 $\boldsymbol{Sc}$ 进行列重排得到二维数据 $\boldsymbol{St}$(式(2)),列重排操作可减弱缝洞地震响应的相干性,然后对重排数据 $\boldsymbol{St}$ 进行奇异值分解(式(3)). 式(2)、(3)为:

$$\boldsymbol{St} = Ts(\boldsymbol{Sc}) = \left[s_{i-\frac{m}{2},j-\frac{n}{2}}, \cdots, s_{i,j}, \cdots, s_{i+\frac{m}{2},j+\frac{n}{2}} \right], \tag{2}$$

$$\mathrm{SVD}(\boldsymbol{St}) = \boldsymbol{U}\boldsymbol{\Sigma}\boldsymbol{V}^{\mathrm{T}}, \tag{3}$$

式中,m、n 为地震数据子体 $\boldsymbol{Sc}$ 的面元尺寸,即为 m 条地震线、n 条地震道,$\boldsymbol{s}_{i,j}$ 为中心数据,采样点数为 k,$\boldsymbol{St}$ 为列重排数据,$Ts(\cdot)$ 为列重排函数,$\boldsymbol{\Sigma}$ 为奇异值矩阵;$\boldsymbol{U} = [\boldsymbol{u}_1, \boldsymbol{u}_2, \cdots, \boldsymbol{u}_k]$、$\boldsymbol{V}^{\mathrm{T}} = [\boldsymbol{v}_1, \boldsymbol{v}_2, \cdots, \boldsymbol{v}_{m \times n}]$,分别为左、右奇异向量矩阵.

(2)设计带通滤波器

在奇异值分解之后,根据右奇异向量相似性约束及累计能量约束原则(具体见 1.2 节),确定可表征缝洞响应与噪声响应的截断奇异值,从而构建响应的带通滤波器 $W(x)$,本文称其为缝洞分离算子.

(3)地震数据重构

将缝洞分离算子应用至奇异值矩阵,即其每个元素 W_i 与奇异值矩阵主对角线元素 σ_i,进行点乘得到新的奇异值矩阵 $\boldsymbol{\Sigma}_{\mathrm{w}}$,之后将矩阵 $\boldsymbol{U}$、矩阵 $\boldsymbol{V}^{\mathrm{T}}$ 与 $\boldsymbol{\Sigma}_{\mathrm{w}}$,按式(4)进行重构,从而得到该道地震数据在缝洞地震响应分离后的数据 $\boldsymbol{S}_{\mathrm{W}}$:

$$\boldsymbol{S}_{\mathrm{W}} = \boldsymbol{U}\boldsymbol{\Sigma}_{\mathrm{W}}\boldsymbol{V}^{\mathrm{T}}, \boldsymbol{\Sigma}_{\mathrm{W},i,i} = \sigma_i \cdot W_i, \tag{4}$$

式中,$\boldsymbol{\Sigma}_{\mathrm{w}}$,为滤波奇异值矩阵,$\boldsymbol{U}$ 为左奇异向量矩阵,$\boldsymbol{V}^{\mathrm{T}}$ 为右奇异向量矩阵,σ_i,为奇异值矩阵主对角线的第 i 个元素,W_i 为缝洞分离算子的第 i 个元素. 最后,对所有地震数据重复上述过程,从而实现对缝洞体地震响应的分离提取.

1.2 构建缝洞分离算子

如何确定缝洞响应的的截断奇异值,是合理压制背景反射且最大程度保留缝洞响应的关键,前人多利用迭代试验法进行确定(胡永泉等,2019;张银涛等, 2024),该方法存在重复量大、效率较低、主观性强的缺点. 针对以上问题,本节利用右奇异向量之间的相似性约束作为截断奇异值的评价准则,并结合能量比约束实现随机噪声的同步去除,从而根据地震数据特点确定合理的滤波算子,有效提高了截断奇异值选择的客观性和可解释性.

(1)奇异向量相似性约束

由前述可知,经 SVD 后的矩阵可视为由一组按贡献排序的特征图像叠加而成(曹中林等,2017),其中矩阵 $\boldsymbol{V}$ 中右奇异向量可表征输入数据的特征方向,即主成分方向,矩阵 $\boldsymbol{U}$ 中的左奇异向量则代表输出数据的特征方向(高磊等,2013). 因此,根据缝洞体非均质性,可利用右奇异向量间的相似性来衡量地震数据的非均质性,即地震数据的非均质性越强,其相干成分之间的变化越快,则右奇异向量间的相似性越低. 但右奇异向量矩阵为正交矩阵,两两之间内积为零,无法用内积投影进行评价.

针对该问题,本文引入动态时间规整算法

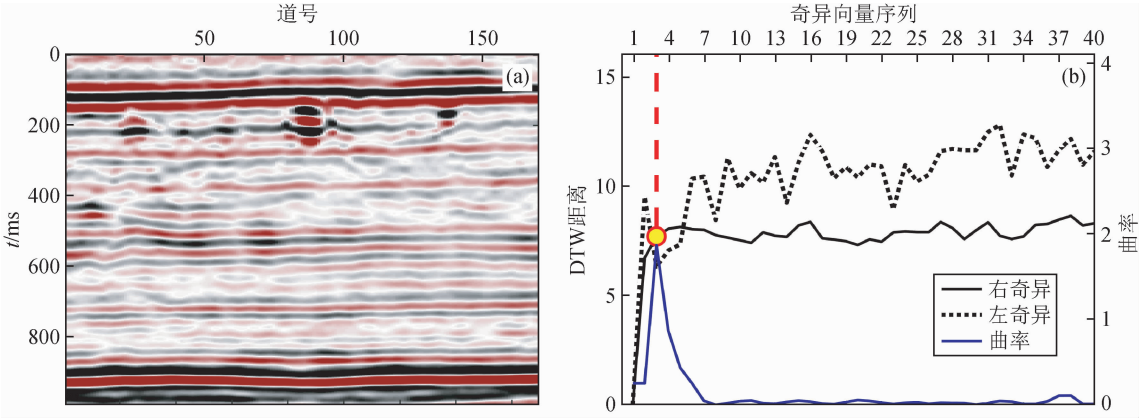


图 1 地震数据(a)及其奇异向量间的 DTW 距离(b)

Fig. 1 Seismic data(a) and DTW distance between singular vectors(b)

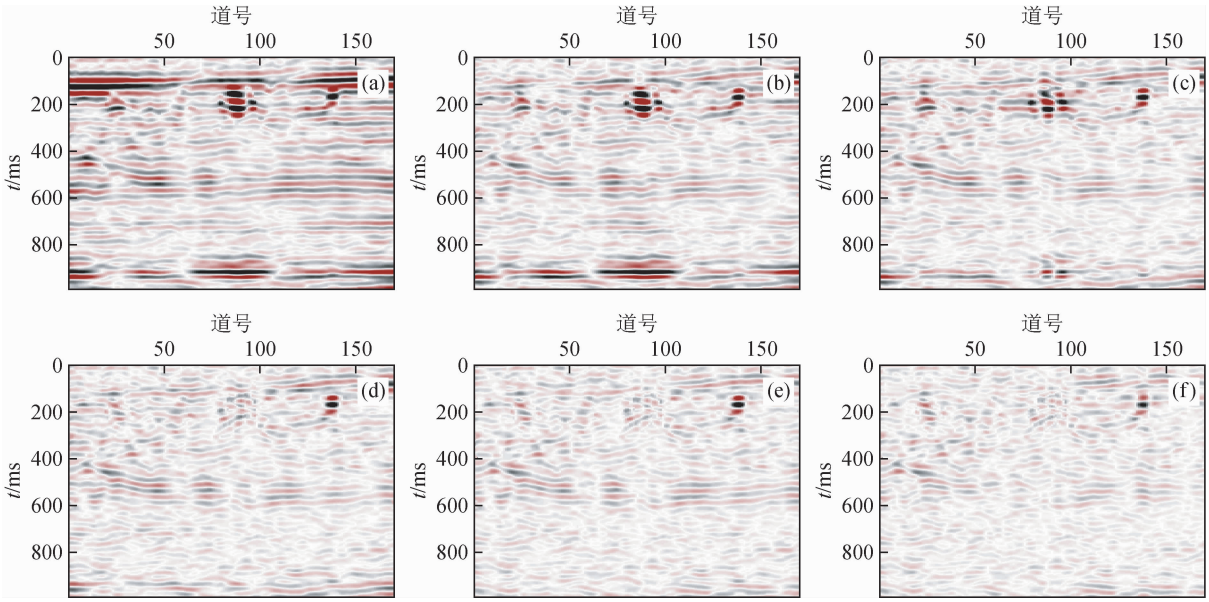


图 2 去除不同范围奇异值后 SVD 重构地震数据

(a)去除第 1 个奇异值;(b) 去除第 1 ~ 2 个奇异值;(c) 去除第 1 ~ 3 个奇异值;
(d) 去除第 1 ~ 4 个奇异值;(e) 去除第 1 ~ 5 个奇异值;(f) 去除第 1 ~ 6 个奇异值.

Fig. 2 SVD-reconstructed seismic data excluding

(a) The 1st singular value; (b) The 1st ~ 2nd singular values; (c) The 1st ~ 3rd singular values;
(d) The 1st ~ 4th singular values; (e) The 1st ~ 5th singular values; (f) The 1st ~ 6th singular values.

(Dynamic Time Warping,DTW)进行相似性评价,该算法是一种衡量两个时间序列之间相似性的经典算法(吴天麒等,2020). 它通过非线性地对齐时间轴,找到序列间最佳匹配路径,从而克服了欧氏距离等刚性度量对时间偏移、伸缩和局部变形敏感的缺陷. 为验证其可行性,本文选取某一地震数据进行讨论分析,如图 1a,该地震数据中含有缝洞体的非均质"串珠状"地震响应,对其进行奇异值分解,并分别对左、右奇异向量 $\boldsymbol{u}$、$\boldsymbol{v}$ 进行 DTW 相似性评价,如图 1b,其 DTW 累积距离越大,则相似性越低,如式(5)所示:

$$\begin{cases} Dv_i = \mathrm{DTW}(v_i, v_1), & i = 1 \cdots n \\ Du_i = \mathrm{DTW}(u_i, u_1), & i = 1 \cdots m \end{cases}, \tag{5}$$

式中,Dv_i、Du_i 为别为第 i 个奇异向量 v_i、u_i 与第 1 个奇异向量 v_1、u_1 的 DTW 累积距离. 从图 1b 可看出,该数据左奇异向量的 DTW 距离则是在快速升高

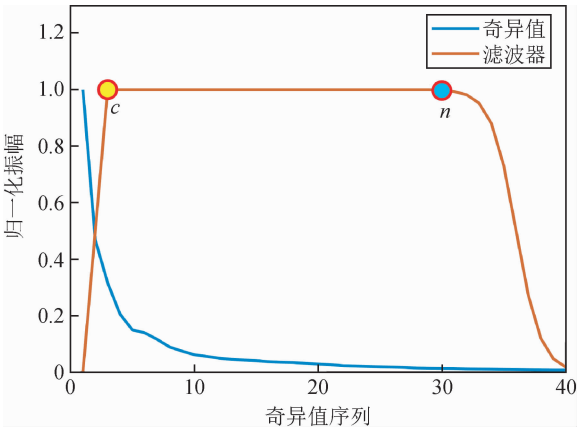


图 3 奇异值分布及缝洞滤波算子示意图

Fig. 3 Schematic diagram of singular value distribution and filtering operator for fracture-cavity

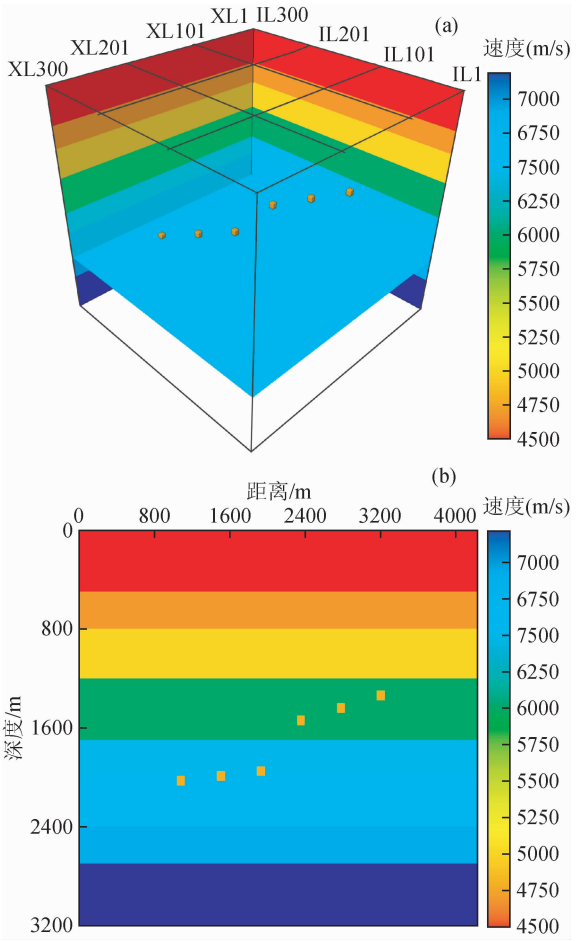


图 4 正演模型

(a)三维模型;(b)沿储集体方向模型剖面.

Fig. 4 Forward model

(a) 3D geological model; (b) Profile along the reservoir direction.

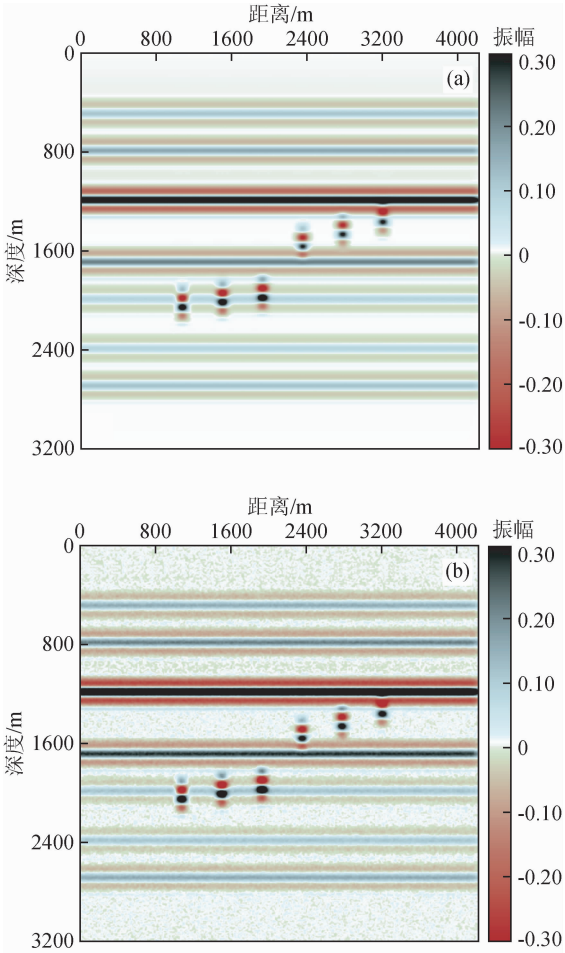


图 5 正演合成地震数据

(a)无噪地震数据;(b)含噪地震数据.

Fig. 5 Forward synthetic seismic data

(a) Noise-free seismic data; (b) Noisy seismic data.

后,之后伴随着较大波动持续上升,不具有明显的分界点;而右奇异向量的 DTW 距离存在一个明显的上升“拐点”(黄色圆圈,序列号 3 附近),过了拐点后则趋于平缓,可将该拐点位置对应的奇异值作为缝洞响应截断奇异值 σ_c;该“拐点”位置可根据 DTW 距离曲线的平滑曲率峰值点来确定,这一位置具有更明确的数学特征,如图 1b 中蓝色曲线所示.

对该地震数据进行逐分量去除的重构实验,由图 2 可知,去除第 1 个奇异值后,其背景层状反射仍有残留;在去除第 1 ~ 4 奇异值后,背景层状反射被压制的同时,其缝洞响应严重损失. 而去除第 1 ~ 2 奇异值后,其背景层状反射基本压制,缝洞响应基本保留;去除 1 ~ 3 个奇异值后,背景反射被明显压制,缝洞响应轻微损失,这说明缝洞响应分量多集中在 2 ~ 3 奇异值对应的特征分量,这也验证了右奇异向

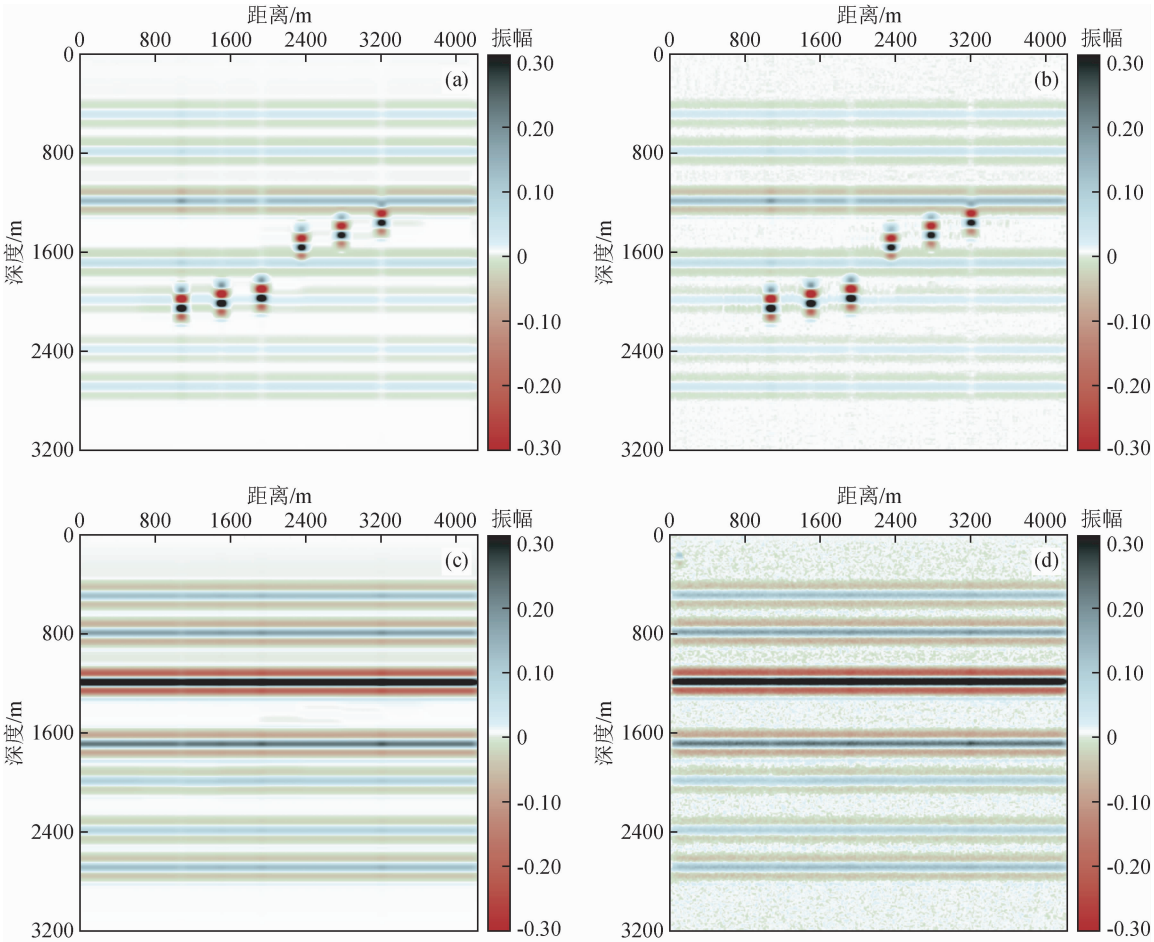


图 6 无噪、含噪时分离缝洞体地震响应及残差地震数据

(a)无噪缝洞分离后地震数据;(b)含噪缝洞分离后地震数据;(c)无噪残差地震数据;(d)含噪残差地震数据.

Fig. 6 Seismic data of separated fracture-cavity bodies and residual seismic data under noise-free and noisy conditions

(a) Separated data (noise-free); (b) Separated data (with noise); (c) Residual data (noise-free); (d) Residual data (with noise).

量相似性确定截断奇异值的合理性及可行性.

(2)能量比约束

同时,由于随机噪声在整个数据体中的分布成无序状态,且其能量占比相较有效信号非常微弱,因此,可以根据重构信号占原始信号的能量比(曹中林等,2017),来确定噪声响应对应的截断奇异值 σ_n,设能量比 99% 时,即 σ_n 前面的奇异值和约占所有奇异值的 99% 以上,如式(6)所示:

$$if\left(\sum_{i=1}^{h}\sigma_i/\sum_{i=1}^{m}\sigma_i \geqslant 0.99 \propto \min(h)\right),\sigma_n = \sigma_h, \tag{6}$$

式中,σ_n 为噪声响应截断奇异值,σ_i 为第 i 个奇异值,&min(h)表示取满足前面条件的最小值 h,m 为所有奇异值的个数.

此外,在求得缝洞响应截断奇异值 σ_c 及噪声响应截断奇异值 σ_n 后,为了避免硬阈值导致的边界效应、损伤有效信号等影响,因此,本文设计一个软阈值窗函数来构建缝洞分离滤波算子,其表达式如式(7)所示,相应的部分奇异值及缝洞滤波算子如图 3 所示,式(7)为:

$$W_i = \begin{cases} h, & i < c - cu \\ \dfrac{(1-h)}{2}\sin\left(\dfrac{\pi}{c-cu}\left(i - \dfrac{c+cu}{2}\right)\right) + \dfrac{(1+h)}{2}, & c-cu \leqslant i < c \\ 1, & c \leqslant i < n - nu \\ \dfrac{1}{1+\exp(i-n+nu+6)}, & n-nu \leqslant i \end{cases}, \tag{7}$$

式中,c、n 分别为截断奇异值 σ_c、σ_n 对应的奇异值索;h 为保护有效信号的小值常数,可取经验值 0.001;cu、nu 分别为边界过渡常整数,其中:cu 一般取经验值 2~3,n-nu 可取能量比为 98% 时对应的奇异值索引.

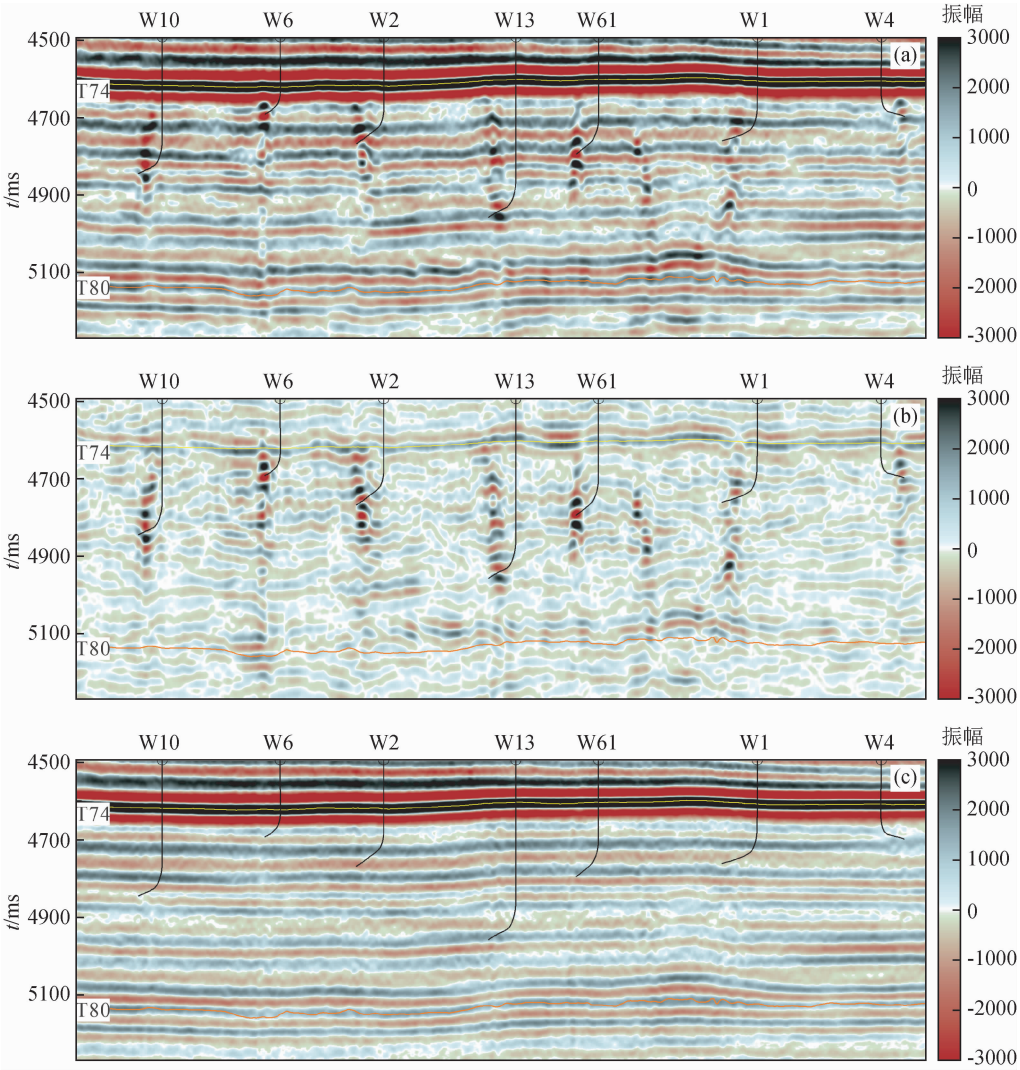


图 7 缝洞分离前、后地震数据及二者残差的连井剖面对比图

(a)分离前连井地震剖面;(b)分离后连井地震剖面;(c)残差连井地震剖面.

Fig. 7 Comparison of well-tied seismic profiles before and after fractured-cavity separation and their residuals

(a) Before separation; (b) After separation; (c) Residuals.

2 模型测试

为验证本文方法的可行性,本节根据塔里木盆地奥陶系碳酸盐岩缝洞型储层的实钻井信息,设计一含洞穴储层的简单三维地质模型,速度模型如图 4a 所示,共有 6 个洞穴储层,洞穴储层尺寸均为长 60 m、宽 60 m、高 80 m,填充速度为 4800 m/s. 其中,位于不整合面(1200 m)下方的三个洞穴储层,其分布深度按 100 m 逐渐递增,而位于下部层界面(2000 m)附近的储层,分别以 40 m 的深度间隔分布在界面的上方、中间及下方,其正演合成地震记录如图 5a 所示;同时,为考虑噪声影响,对原地震记录添加 5% 随机噪声(图 5b),从图中可以看出,洞穴型储层的地震响应为典型“串珠状”地震反射,具有较强的非均质性.

应用本文方法对二者进行缝洞响应分离测试,结果如图 6 所示,从图 6a 中可以看出,在无噪情况下,分离后的地震剖面中“串珠”状地震反射更加凸显,特别是位于强反射下方的串珠,识别更加清晰,背景地层地震反射被有效压制(需要说明的是,由于设置了为保护有效信号的小值常数 h 非零,使得残留部分背景地层地震反射);此外从图 6c 中也可看出,在去除的背景反射剖面中,所关注的“串珠”状地震反射基本无残留,进一步验证了本方法分离

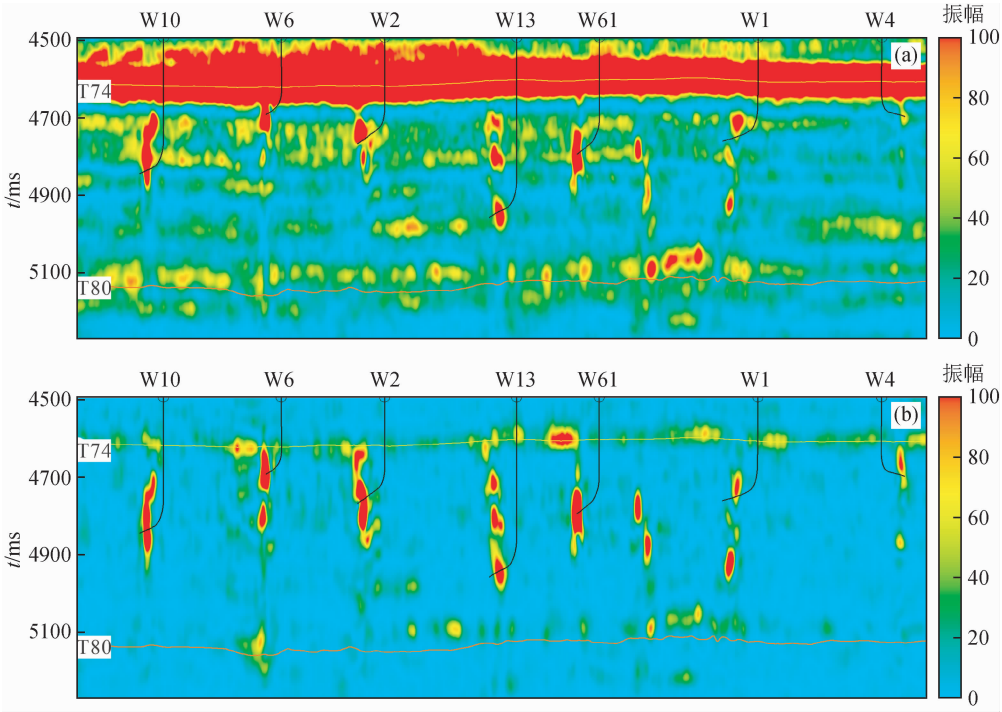


图 8 缝洞分离前、后瞬时能量属性的连井剖面对比图

(a)缝洞分离前瞬时能量属性;(b)缝洞分离后瞬时能量属性.

Fig. 8 Comparison of instantaneous energy attributes before and after fractured-cavity separation along a well-tie section

(a) Before separation; (b) After separation.

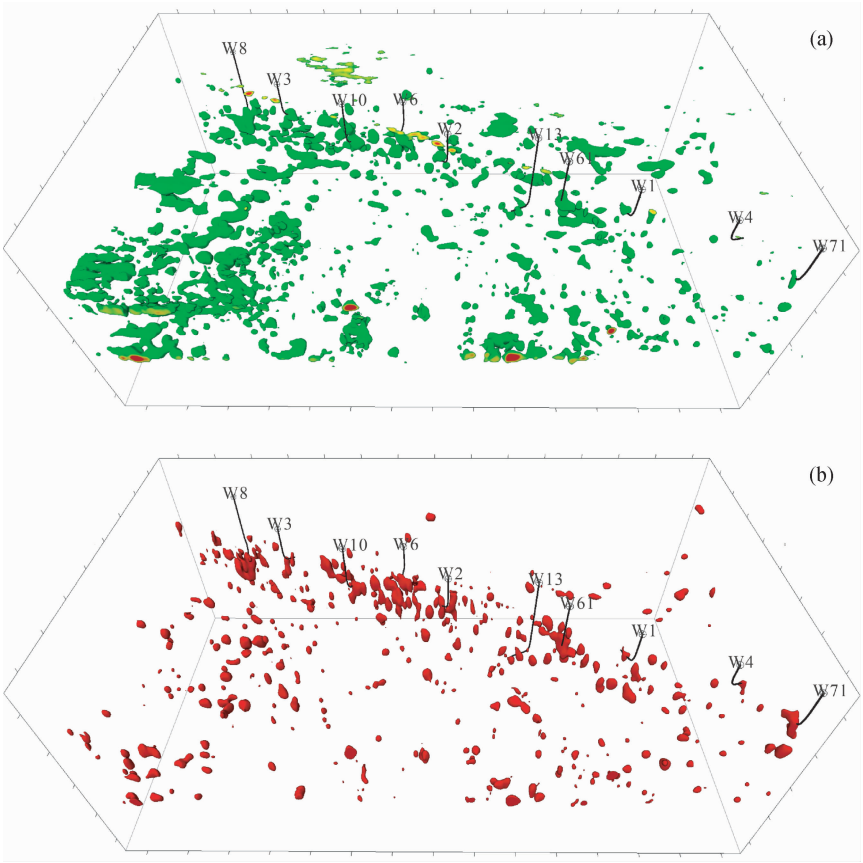


图 9 缝洞分离前、后瞬时能量属性三维雕刻对比图

(a)分离前瞬时能量属性;(b)分离后瞬时能量属性.

Fig. 9 Comparison of 3D carving results for instantaneous energy attributes before and after fracture-cavity separation

(a) Before separation; (b) After separation.

缝洞地震响应的可行性及有效性.

类似的,在含噪情况下,分离后地震剖面中的“串珠”状地震反射明显增强(图 6b),背景地层反射被有效压制,也基本无随机噪声干扰;同时,在去除的背景反射剖面中(图 6d),“串珠”状地震反射基本无残留,而随机噪声被有效去除,说明本方法在有效分离缝洞地震响应的基础上,可同步去除随机噪声,以进一步提高地震信噪比.

3 实际应用

以塔里木盆地某探区为例,选取一块三维叠后地震数据体,其中一条连井地震剖面如图 7a 所示,原始地震剖面中缝洞体“串珠”状地震响应较为发育,且 4700、4800、5100 ms 附近的内幕串珠弱信号被背景地层反射压制;同时,从相应的瞬时能量剖面可以看出(图 8a),缝洞储集体相较围岩,呈强能量特征,但部分串珠能量被背景地层反射干扰,其中位于 T74 强反射下方的串珠有效信号基本被淹没,难以被有效识别(熊艳梅等,2024);且从瞬时能量属性的三维雕刻图中可以看出(图 9a)全区雕刻体中“平层、板状”现象明显,背景地层反射干扰严重,井震匹配性较差,如 W4 井周串珠弱能量体未能有效刻画,不利于后续的储集体识别、空间刻画及储量计算等工作.

之后利用本文方法对该数据体进行缝洞响应分离,处理结果如其如图 7b 所示,相较图 7a,其缝洞储集体对应的“串珠”状地震响应更加凸显,W4、W2、W6 井位于 T74 强反射下方的串珠识别更加清晰,特别是 W1 井、W4 井处的串珠弱反射被有效增强,4700、4800、5100 ms 附近的层状背景反射得以有效压制,从两者的残差结果可以看出(图 7c),分离去除的背景地震反射中“串珠”状地震响应有效信号基本没有损失,压制去除的主要是层状背景强反射及随机噪声响应.

同时,从缝洞分离后地震数据的瞬时能量属性图上可知(图 8b),4700、4800、5100 ms 附近的层状背景强能量干扰被明显压制,其中被掩盖的弱串珠反射得以凸显增强(如 W2、W6 井底下方),且形态更加合理、能量更加聚焦.此外,从相应的瞬时能量三维雕刻图中可以看出(图 9b),全区瞬时能量雕刻体中“平层、板状”现象被有效压制、消除,缝洞体形态更加典型、位置规模更加准确,与已钻井的位置也更加吻合;规模较小的缝洞体弱信号也得以凸显,特别是 W4 井周的串珠体明显增强,有效提升了缝洞储集体的识别精度及空间刻画可靠性,可为后续的储集体识别、地震相描述、储量计算提供可靠支撑.

4 结 论

(1)右奇异向量之间 DTW 相似距离”拐点”处对应的奇异值,可作为有效分离背景地层地震反射与缝洞体地震响应的截断奇异值;

(2)本文方法对非均质的缝洞体地震响应实现了有效分离,可压制背景地层反射及随机噪声的同时,对弱串珠信号进行增强,处理后结果对于后续地震相识别、储层预测等工作具有重要意义.

值得注意的是,本法更适用于沉积稳定、构造不复杂、缝洞型储层发育的探区,针对构造剧烈变化、特殊岩性发育的地区,需进行构造恢复、构造导向等特殊处理,来尽量提升分离效果,这也本文方法进一步改进的方向.

致 谢 感谢审稿专家提出的修改意见和编辑部的大力支持!

References

Bekara M, Van der Baan M. 2007. Local singular value decomposition for signal enhancement of seismic data. Geophysics, 72(2): V59-V65.

Cao Z L, Chen H F, He G M, *et al*. 2017. Hybrid SVD filtering method in complex domain and its application in random noise suppression. Progress in Geophysics (in Chinese), 32(6): 2424-2429, doi: 10.6038/pg20170619.

Chen M T, Yang W C, Yan P, *et al*. 2020. Two-dimensional spatial data fusion method based on SVD decomposition. Progress in Geophysics (in Chinese), 35(3): 940-949, doi: 10.6038/pg2020DD0351.

Dong L Q, Zhang M G, Luo F, *et al*. 2021. Blended noise suppression based on SVD constrained iterative inversion. Oil Geophysical Prospecting (in Chinese), 56(1): 57-61, 117.

Gan S W, Chen Y K, Zu S H, *et al*. 2015. Structure-oriented singular value decomposition for random noise attenuation of seismic data. Journal of Geophysics and Engineering, 12(2): 262-272.

Gao L, Chen W C, Wang B L, *et al*. 2013. Zero-offset VSP wavefield separation using Two-Step SVD approach. Chinese J. Geophys. (in Chinese), 56(5): 1667-1675, doi: 10.6038/cjg20130524.

Gao L, Xia X, Min F. 2023. An adaptive SVD fusion denoising algorithm in time and frequency domain. Journal of Zhengzhou University (Natural Science Edition) (in Chinese), 55(6): 48-54.

He Z L, Zhu C H, Xu W Y, *et al*. 2023. Seismic characterization of multi-type deep/ultra-deep carbonate reservoir. Chinese J. Geophys. (in Chinese), 66(1): 65-82, doi: 10.6038/cjg2022Q0432.

Hu H P, Xu Z W, Wei X, *et al*. 2025. Seismic data denoising based on principal component analysis and K-SVD. Oil Geophysical Prospecting (in Chinese), 60(2): 371-382.

Hu Y Q, Huang J B, Tian Z H, *et al*. 2019. Ground microseismic data denoising based on single-channel singular value decomposition and amplitude ratio. Geophysical Prospecting for Petroleum (in

Chinese), 58(1): 43-52, 62.
Jiang T, Zou Y Y, Yue Y G, *et al*. 2017. Angle domain seismic beam-forming method based on singular value decomposition. Geophysical Prospecting for Petroleum (in Chinese), 56(5): 667-675, 683.
Kreimer N, Sacchi M D. 2012. A tensor higher-order singular value decomposition for prestack seismic data noise reduction and interpolation. Geophysics, 77(3): V113-V122.
Li J. 2019. Seismic denoising in the angle domain based on singular value decomposition. Geophysical Prospecting for Petroleum (in Chinese), 58(3): 427-432, 443.
Liu B T, Liu Q Y. 2020. Random noise reduction using SVD in the frequency domain. Journal of Petroleum Exploration and Production Technology, 10(7): 3081-3089.
Liu H Y, Hu J T, Huang C, *et al*. 2025. Seismic noise suppression method based on fault-preserving singular value spectrum analysis. Geophysical Prospecting for Petroleum (in Chinese), 64(5): 835-844.
Lü B N, Chen X H, Wu H J, *et al*. 2024. A fine seismic prediction method for complex carbonate fractured-vuggy reservoirs. Geophysical Prospecting for Petroleum (in Chinese), 63(2): 426-436.
Ma J T, Wang J H, Liu G C. 2016. Seismic data noise attenuation and interpolation using singular value decomposition in frequency domain. Geophysical Prospecting for Petroleum (in Chinese), 55(2): 205-213.
Ma X J, Wu Q J. 2020. Denoising noise cross-correlations via moving time-window weighted-SVD method. Progress in Geophysics (in Chinese), 35(6): 2083-2089, doi: 10.6038/pg2020DD0530.
Ma Y, Cau X Y, Li M W, *et al*. 2024. Research advances on the mechanisms of reservoir formation and hydrocarbon accumulation and the oil and gas development methods of deep and ultra-deep marine carbonates. Petroleum Exploration and Development (in Chinese), 51(4): 692-707.
Oropeza V, Sacchi M. 2011. Simultaneous seismic data denoising and reconstruction via multichannel singular spectrum analysis. Geophysics, 76(3): V25-V32.
Porsani M J, Ursin B, Silva M G, *et al*. 2013. Dip-adaptive singular-value decomposition filtering for seismic reflection enhancement. Geophysical Prospecting, 61(1): 42-52.
Shen H Y. 2012. Seismic data processing for Ordos basin with wave fields separation and denoising via SVD. Progress in Geophysics (in Chinese), 27(5): 2051-2058, doi: 10.6038/j.issn.1004-2903.2012.05.028.
Shen H Y, Li Q C. 2012. Seismic wavefield separation and denoising for P-P wave and P-S wave by singular value decomposition (SVD). Oil Geophysical Prospecting (in Chinese), 47(5): 690-697.
Siahsar M A N, Gholtashi S, Torshizi E O, *et al*. 2017. Simultaneous denoising and interpolation of 3-D seismic data via damped data-driven optimal singular value shrinkage. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 14(7): 1086-1090.
Wang C, Wang W H. 2020. Optimal method of SVD for micro-seismic data based on background noise and eigenvalue ratio of reduction. Journal of Northeast Petroleum University (in Chinese), 44(5): 1-12.
Wang R R, Dai Y S, Li C, *et al*. 2015. An evaluation criterion on the accuracy of time-varying wavelet extraction based on singular value decomposition. Geophysical Prospecting for Petroleum (in Chinese), 54(5): 531-540.
Wei W, Gao H, Liu Z Y. 2020. Separation and imaging of seismic diffractions using singular value decomposition. Geophysical Prospecting for Petroleum (in Chinese), 59(2): 236-241.
Wu T Q, Wang Y Z, Guo X B, *et al*. 2020. The application of improved Dynamic Time Warping in angle-domain gather stacking. Progress in Geophysics (in Chinese), 35(5): 1878-1887, doi: 10.6038/pg2020DD0376.
Xiong Y M, Wang X Y, Zhu B H. 2024. Reflection analysis and identification of fracture-cavity body under strong reflection background. Progress in Geophysics (in Chinese), 39(3): 1102-1110, doi: 10.6038/pg2024HH0429.
Zhang B X, Zhang G J, Liu J S, *et al*. 2024. Research progress on identification and carving methods of carbonate fracture-cavity reservoirs. Progress in Geophysics (in Chinese), 39(2): 580-593, doi: 10.6038/pg2024HH0170.
Zhang Y T, Lin C Y, Luo X, *et al*. 2024. Method for extracting seismic features and tracing energy ridges in deep fractured-vuggy reservoirs. Oil Geophysical Prospecting (in Chinese), 59(5): 1132-1140.
Zhu B H, Wang Y, Zhang S H, *et al*. 2024. Spatial positioning for fracture-cavity bodies based on frequency-segmented scale constraints. Oil Geophysical Prospecting (in Chinese), 59(5): 1111-1120.

附中文参考文献

曹中林, 陈浩凡, 何光明, 等. 2017. 基于复数域混合 SVD 滤波方法及在随机噪声压制中的应用. 地球物理学进展, 32(6): 2424-2429, doi: 10.6038/pg20170619.
陈勐韬, 杨文采, 颜萍, 等. 2020. 基于 SVD 分解的二维空间数据融合方法. 地球物理学进展, 35(3): 940-949, doi: 10.6038/pg2020DD0351.
董烈乾, 张慕刚, 骆飞, 等. 2021. 应用 SVD 约束的迭代反演混叠噪声压制方法. 石油地球物理勘探, 56(1): 57-61, 117.
高磊, 陈文超, 王保利, 等. 2013. 基于两步 SVD 变换的零偏 VSP 资料上下行波场分离方法. 地球物理学报, 56(5): 1667-1675, doi: 10.6038/cjg20130524.
高磊, 夏星, 闵帆. 2023. 时域与频域自适应 SVD 融合去噪算法. 郑州大学学报(理学版), 55(6): 48-54.
何治亮, 朱成宏, 徐蔚亚, 等. 2023. 深层-超深层碳酸盐岩多类型储集体地震预测. 地球物理学报, 66(1): 65-82, doi: 10.6038/cjg2022Q0432.
胡海鹏, 徐振旺, 未晛, 等. 2025. 基于 PCA 与 K-SVD 的地震数据去噪方法. 石油地球物理勘探, 60(2): 371-382.
胡永泉, 黄建波, 田志华, 等. 2019. 基于单道 SVD 和振幅比的地面微地震资料去噪方法. 石油物探, 58(1): 43-52, 62.
姜弢, 邹艳艳, 岳永高, 等. 2017. 基于奇异值分解的角度域地震波束形成方法. 石油物探, 56(5): 667-675, 683.
李江. 2019. 基于奇异值分解的角度域去噪方法. 石油物探, 58(3): 427-432, 443.
刘浩运, 胡江涛, 黄超, 等. 2025. 基于断层保护奇异值谱分析的地震噪声压制方法. 石油物探, 64(5): 835-844.
吕丙南, 陈学华, 吴昊杰, 等. 2024. 复杂碳酸盐岩缝洞型储层的地震精细预测方法. 石油物探, 63(2): 426-436.
马继涛, 王建花, 刘国昌. 2016. 基于频率域奇异值分解的地震数据插值去噪方法研究. 石油物探, 55(2): 205-213.
马小军, 吴庆举. 2020. 背景噪声互相关去噪的滑动窗加权 SVD 滤波方法. 地球物理学进展, 35(6): 2083-2089, doi: 10.6038/pg2020DD0530.
马永生, 蔡勋育, 黎茂稳, 等. 2024. 深层—超深层海相碳酸盐岩成储成藏机理与油气藏开发方法研究进展. 石油勘探与开发, 51(4): 692-707.
沈鸿雁. 2012. SVD 地震波场分离与去噪技术在鄂尔多斯盆地地震资料处理中的应用. 地球物理学进展, 27(5): 2051-2058, doi: 10.6038/j.issn.1004-2903.2012.05.028.
沈鸿雁, 李庆春. 2012. 奇异值分解地震纵、横波波场分离与去噪方

法. 石油地球物理勘探, 47(5): 690-697.
王程, 王维红. 2020. 基于背景噪声和特征值下降比的微地震 SVD 去噪改进方法. 东北石油大学学报, 44(5): 1-12.
王蓉蓉, 戴永寿, 李闯, 等. 2015. 基于奇异值分解的时变子波提取准确性评价方法. 石油物探, 54(5): 531-540.
魏巍, 高鸿, 刘忠岩. 2020. 奇异值分解技术在绕射波分离成像中的应用研究. 石油物探, 59(2): 236-241.
吴天麒, 王云专, 郭雪豹, 等. 2020. 基于互相关改进的 DTW 在角道集叠加优化中的应用. 地球物理学进展, 35(5): 1878-1887, doi: 10.6038/pg2020DD0376.
熊艳梅, 王欣语, 朱博华. 2024. 强反射背景下缝洞体反射特征分析及识别. 地球物理学进展, 39(3): 1102-1110, doi: 10.6038/pg2024HH0429.
张滨鑫, 张冠杰, 刘敬寿, 等. 2024. 碳酸盐岩缝洞型储层识别与雕刻方法研究进展. 地球物理学进展, 39(2): 580-593, doi: 10.6038/pg2024HH0170.
张银涛, 林承焰, 罗枭, 等. 2024. 深层缝洞体地震特征提取与能量脊线追踪. 石油地球物理勘探, 59(5): 1132-1140.
朱博华, 王洋, 张胜寒, 等. 2024. 基于分频尺度约束的缝洞体空间定位方法. 石油地球物理勘探, 59(5): 1111-1120.