

基于自适应噪声反馈机制的地震资料去噪方法*

张宝金¹, 成谷²

- (1. 广州海洋地质调查局//国土资源部海底矿产资源重点实验室, 广东 广州 510760;
2. 中山大学地球科学与地质工程学院//广东省地质过程与
矿产资源探查重点实验室, 广东 广州 510275)

摘要: 大多数去噪方法在去噪的同时会产生假象, 导致去噪后的剖面保真度受到破坏。将噪声归结为非均衡噪声和均衡噪声两种类型, 采用两步法策略进行噪声衰减, 先衰减非均衡噪声, 再衰减均衡噪声。针对两种噪声分布情况, 建立指示因子 NCR 和 SCR 表示常规信噪分离后噪声剖面和信号剖面的可靠性。分析指示因子 NCR 和 SCR 对噪声和信号可靠性的指示意义, 据此设计自适应噪声反馈系数, 将信噪分离后的噪声剖面乘以自适应反馈系数并加回到信号剖面中, 形成一种基于自适应噪声反馈机制的去噪方案。数据测试表明方法具有较好效果。

关键词: 噪声衰减; 保真度; 信噪比; 自适应; 反馈

中图分类号: P631.44 **文献标志码:** A **文章编号:** 0529-6579(2017)01-0145-06

Seismic noise attenuation method based on adaptive noise feedback strategy

ZHANG Baojin¹, CHENG Gu²

- (1. Guangzhou Marine Geology Survey//Key Laboratory of Marine Mineral Resources, Ministry of Land and Resources of PRC, Guangzhou 510760, China;
2. School of Earth Science and Geological Engineering, Sun Yat-sen University// Guangdong Provincial Key Laboratory of Mineral Resources & Geological Processes, Guangzhou 510275, China)

Abstract: Most seismic noise attenuation methods will reduce the data fidelity. A kind of adaptive noise attenuation scheme based on feedback mechanism is introduced in this paper. Noises in seismic data are classified into two categories: unbalanced and balanced noises. Two-step strategy is taken. The unbalanced noises are attenuated first and then the balanced noises. Two indicators NCR and SCR are established to denote the reliability of noise and signal section aiming at the two kinds of noises. The meanings of NCR and SCR are analyzed, adaptive noise feedback coefficient is designed based on the two indicators, the simultaneous enhancement of signal-to-noise ratio and fidelity is achieved. Tests demonstrate that the method is effective.

Key words: noise attenuation; fidelity; signal-to-noise ratio; self-adaption; feedback

地震数据中噪声的存在模糊了有效信号, 噪声压制是地震数据处理中非常重要的一步。去除噪声

的手段有很多种。Choo and Sudhakar^[1]提出了智能引导滤波方法; 张之涵等^[2]、姚恒星等^[3]研究了

* 收稿日期: 2016-01-27

基金项目: 国家自然科学基金(41004051); 国家高技术研究发展计划(2013AA092501); 广东省自然科学基金(2016A030313311)

作者简介: 张宝金(1973年生), 男; 研究方向: 海洋地球物理; E-mail: zhangbaojinchg@163.com

通信作者: 成谷(1975年生), 女; 研究方向: 地震数据处理方法; E-mail: chenggu@mail.sysu.edu.cn

基于曲波变换的去噪方法;王姣等^[4]讨论了小波阈值去噪方法;李先苦等^[5]探讨了基于轮廓波变换的去噪算法;王维强等^[6]对基于 EMD 与 ICA 的地震信号去噪技术进行了研究;刘成明等^[7]探讨了基于 shearlet 变换的地震随机噪声压制方法;刘伟等^[8]对基于压缩感知和 TV 准则约束的地震资料去噪方法进行了研究。张孝珍等^[9]对时频分析方法、反偏移方法、径向道变换法和基于支持向量机、形态学、独立成分分析的去噪方法进行了评述。但大多数去噪方法在去噪的同时会产生假象,导致去噪后的剖面保真度受到破坏。张宝金等^[10]指出了提高去噪效率、降低去噪强度达到保真去噪的思路,并指出有效衰减强噪声,提高噪声衰减的可靠性是保真去噪的关键。本文提出了建立指示因子对信噪分离后的信、噪剖面的可靠性进行评估,并据可靠性指标因子建立自适应噪声反馈系数,将信噪分离后的噪声剖面乘以自适应反馈系数并加回到信号剖面中,形成一种基于自适应噪声反馈机制的去噪方案。这是提高去噪效率、降低去噪强度的一种自适应实现方法。对剖面的可靠性评估可借鉴信噪比的定量估算方法^[11],李庆忠院士^[12]认为用含信比更为恰当。通常计算信号或噪声的能量采用的是时窗内的振幅平方和,这种算法在数据过零点附近能量是不正确的,本文采用瞬时振幅来表达信号的能量应更为合理。

1 基于自适应噪声反馈机制的去噪方法

大多数信噪分离方法都会在分离后的噪声剖面中造成有效信号残留,这部分残留的有效信号应反馈回信号剖面。即基于噪声反馈机制的过程可表述如下:

$$y = s + n \cdot \omega$$

其中, s 表示信噪分离后的有效信号, n 表示信噪分离后的噪声剖面, ω 是噪声反馈系数,在噪声剖面的不同采样点处该值不应取为定值,而应随不同采样点处噪声的可靠性动态变化, $n \cdot \omega$ 表示噪声剖面中的残留有效信号, y 表示将噪声剖面中的残留有效信号加回到信号剖面的结果。

噪声反馈系数的确定是关键。反馈系数的值应在 $0 \sim 1$ 之间变化,如某样点处计算得到的反馈系数接近于 0 ,则该样点的信息被以较小的比例反馈加回信号剖面。如某样点处计算得到的反馈系数接近于 1 ,则该样点的信息被以较大的比例反馈加回信号剖面。因此,反馈系数的取值应取决于信号或

噪声的可靠程度。本文首先建立 2 个指示因子评估信号或噪声剖面中各样点值的可靠性。

1.1 NCR 和 SCR 指示因子

将时空域地震数据中的噪声分为 2 种类型:一种是均衡噪声,一种是非均衡噪声。均衡噪声指剖面中不同采样点处噪声的幅度相差不大;反之,非均衡噪声指剖面中不同采样点处噪声的幅度有较大的差别。通常地震数据中既包含均衡噪声也包含非均衡噪声。在衰减噪声时可采取两步策略,先衰减非均衡噪声,在非均衡噪声衰减后,剖面中的噪声以均衡噪声为主,然后对均衡噪声进行衰减。

信噪分离后,信号和噪声的能量可分别计算,同时可计算出平均噪声能量(表示为 EN)。对于均衡噪声,平均噪声能量与每个样点处的噪声能量基本处于相同的量级。而对于非均衡噪声,具有较大噪声能量的样点处,其噪声能量值远大于平均噪声能量,具有较小噪声能量的样点处,其噪声能量值远小于平均噪声能量。

根据均衡和非均衡两种噪声分布情况下样点处的噪声能量和平均噪声能量的关系,文中分别采用两种指示因子 NCR 和 SCR 来表明信号和噪声的可靠性。

1.1.1 NCR 衡量非均衡噪声情况噪声的可靠性

指示因子 NCR 表述为 $N/(N + EN)$,其中 N 表示每个采样点处的噪声能量,EN 表示整个噪声剖面的平均噪声能量。NCR 可用来衡量非均衡噪声分布情况下噪声的可靠性。在非均衡噪声分布情况下,对那些具有较大噪声能量的采样点, $N \gg EN$,因此 NCR 趋向于向 1 变化,对那些具有较小噪声能量的采样点, $N \ll EN$,因此 NCR 趋向于向 0 变化。在衰减非均衡噪声阶段,对噪声的衰减集中在大能量噪声处,因此 NCR 越大,表明该采样点处对应的噪声越可靠。见图 1(a)所示。

1.1.2 SCR 衡量均衡噪声情况信号的可靠性

指示因子 SCR 表述为 $S/(S + EN)$,其中 S 表示每个采样点处的信号能量,EN 表示整个噪声剖面的平均噪声能量。SCR 可用来衡量均衡噪声分布情况下信号的可靠性。当大多数非均衡噪声已被有效分离,地震数据中的噪声以均衡噪声为主,此时对地震数据采用常规去噪方法实现信噪分离后,噪声剖面中主要为均衡噪声,且一般有 $EN \ll S$,所以 SCR 的值将趋向于 1 变化。且信号的能量越强,SCR 的值越趋近于 1 。在这种情况下,采样点处 SCR 的值越大,表明该采样点处信号能量越强,对应的信号越可靠(图 1(b))。

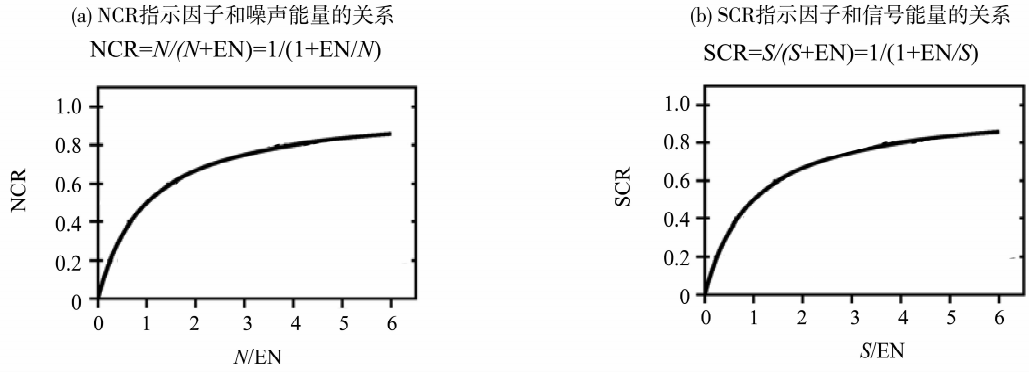


图 1 两个指示因子与信噪分离可靠性的关系

Fig. 1 Relationship between two indicators and reliability of signal-noise-separation

1.2 自适应反馈系数

如上文所述，指示因子 NCR 用来表征分离非均衡噪声的可靠性，SCR 用来表征分离均衡噪声的可靠性。NCR 和 SCR 的值都在 0~1 之间变化。如果某采样点处指示因子 NCR 或 SCR 接近于 0，则表明该样点处信噪分离过程是不可靠的，噪声剖面中有较多的有效信号残留，该样点处的反馈系数应给与较大的值。反之，如果某采样点处 NCR 或 SCR 接近于 1，则表明该样点处信噪分离过程是可靠的，噪声剖面中有较少的有效信号残留，该样点处的反馈系数应给与较小的值。因此自适应反馈系数 ω 应与 NCR 或 SCR 成负相关关系。据此设计了两种噪声分布情况下的自适应反馈系数。

1.2.1 非均衡噪声情况 对非均衡噪声，有

$$\omega = 1 - NCR, \text{ 当 } NCR > NCR_THRESHHOLD$$

$$\omega = 1, \text{ 当 } NCR < NCR_THRESHHOLD$$

其中 NCR_THRESHOLD 是一门槛阈值，可根据数据情况选取，本文取为 0.2 左右。

非均衡噪声为主情况下，具有较大能量的强噪声是主要去除目标。信噪分离后，噪声剖面中某样点处的 NCR ($NCR = N / (N + EN)$) 值越大，表明该样点处对应的噪声能量越强，表明分离出来的噪声越可靠（是真实噪声的可能性越大），因此该样点的贡献在加回到信号剖面中时应给与较小的反馈系数 $1 - NCR$ ；反之，噪声剖面中某样点处的 NCR 值越小，表明该样点对应的噪声能量越弱，可能对应有效信号或均衡噪声，因此该样点的贡献在加回到信号剖面中时应给与较大的反馈系数 $1 - NCR$ 。当噪声剖面中某样点处计算得到的 NCR 值小于给定的阈值时，采用保护机制令该样点的值在加回到信号剖面中时具有 100% 的贡献率。自适应反馈系数与 NCR 成负相关关系。自适应反馈系数使得噪

声剖面中具有较大能量的样点值以较少的贡献加回到信号剖面，具有较小能量的样点值以较大的贡献加回到信号剖面。

1.2.2 均衡噪声情况 对均衡噪声，同样有

$$\omega = 1 - SCR, \text{ 当 } SCR > SCR_THRESHHOLD$$

$$\omega = 1, \text{ 当 } SCR < SCR_THRESHHOLD$$

SCR_THRESHOLD 是一门槛阈值，可根据数据情况通过测试确定，本文取为 0.2 左右。

当主要针对均衡噪声进行衰减时，选择 NCR 作为指示因子就不合适了。对均衡噪声来说，样点处的噪声能量与平均噪声能量数值接近，NCR 保持为 0.5 左右，不能反映信噪分离过程的可靠性。在此情况下，应把注意力集中在信号上，故选择 SCR 作为指示因子。某样点处 SCR 的值越大，表明信号剖面中对应样点的信号能量越强，信号的可靠性越强，此时来自噪声剖面中的反馈应取为越小的值；反之，若某样点处 SCR 的值越小，表明信号剖面中对应样点处的信号能量越弱，信号的可靠性越差，此时来自噪声剖面的反馈应取为越大的值。当某样点处计算得到的 SCR 值小于给定的阈值时，表明该样点处的信号值非常弱，同样采用保护机制将该样点处对应的噪声能量以 100% 的贡献加回到信号剖面中。自适应反馈系数与 SCR 成负相关关系。自适应反馈系数使得信号剖面中具有较大信号能量的样点值从噪声剖面中加回较少的噪声贡献量，信号剖面中具有较小信号能量的样点值从噪声剖面中加回较多的噪声贡献量。

2 数据测试

针对实际资料，采用通常使用的去噪方法 (FXDECON) 进行信噪分离，然后应用本文方法进行噪声反馈，实例如下。

2.1 非均衡噪声衰减示例

图 2 所示为非均衡噪声衰减示例。图 2(a) 为地震数据, 内含均衡及非均衡两种噪声。图 2(b) 为信噪分离后的信号剖面。图 2(c) 为信噪分离后的噪声剖面, 从噪声剖面中可以看出, 信噪分离过程损害了有效信号, 在噪声剖面中除有较强的非均衡噪声外还有较大的有效信号残留。图 2(d) 为由噪声剖面计算得出的 NCR 指示因子剖面, 噪声能量由瞬时振幅求取。利用由 NCR 剖面计算得到的自适应反馈因子, 把大部分小能量的噪声反馈回信号剖面形成图 2(f), 即自适应反馈后的信号剖面, 与图 2(b) 相比, 保真度损失较小。图 2(e) 为自

适应反馈后的噪声剖面, 与图 2(c) 比较, 大部分残留信号已加回到信号剖面, 噪声剖面中的残留有效信号大大减少。

2.2 均衡噪声衰减示例

图 3 所示为均衡噪声衰减示例。图 3(a) 所示为地震数据。图 3(b) 为采用常规信噪分离方法后得到的信号剖面。图 3(c) 为信噪分离后的噪声剖面, 剖面中的噪声以均衡噪声为主。图 3(d) 为由信号剖面和平均噪声能量计算得到的 SCR 剖面, 其值在 0~1 之间变化。图 3(e) 为由 SCR 剖面计算得到的自适应反馈系数剖面。图 3(f) 为自适应反馈后的信号剖面。

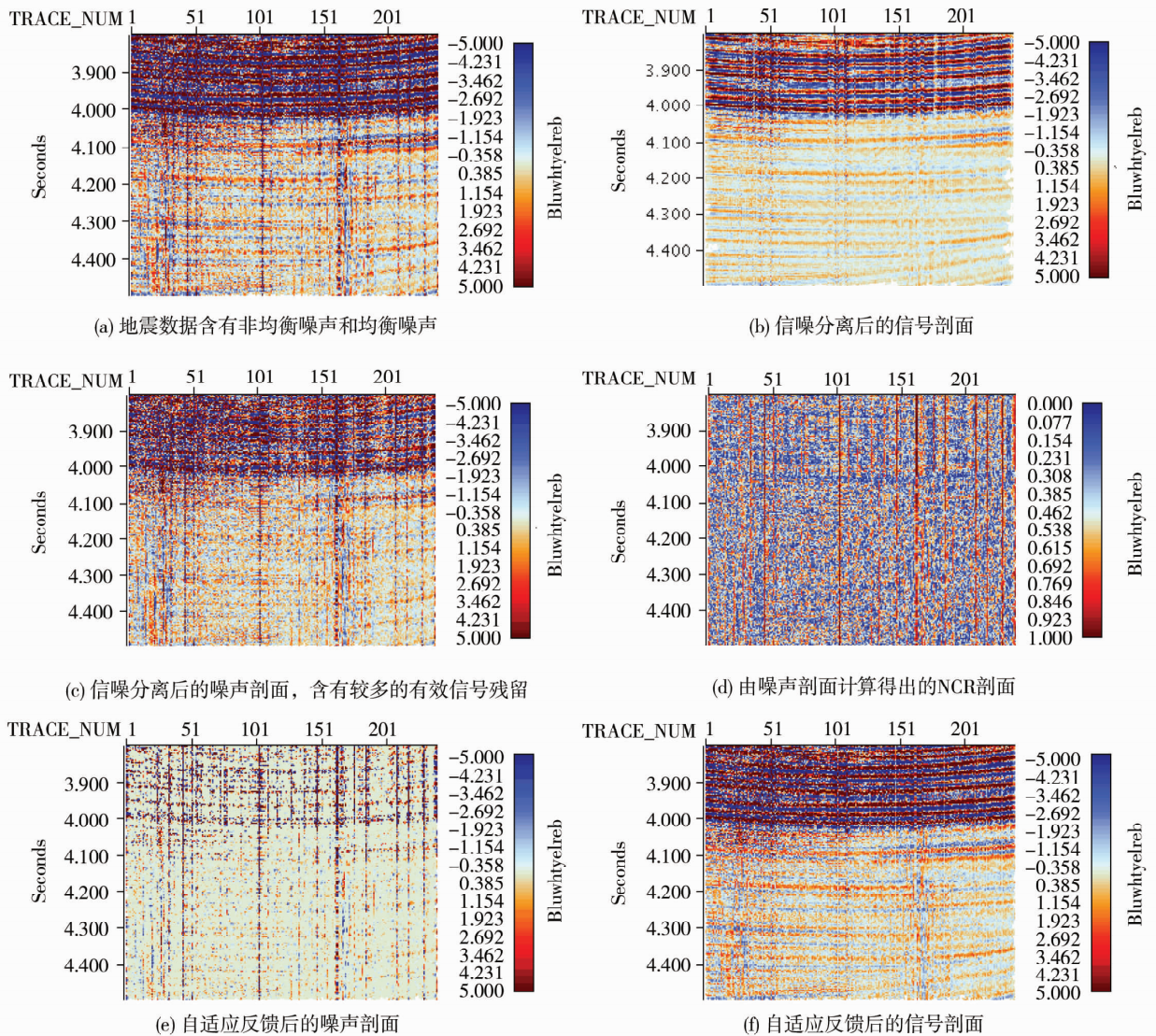


图 2 非均衡噪声衰减过程

Fig. 2 The process of attenuating unbalanced noise

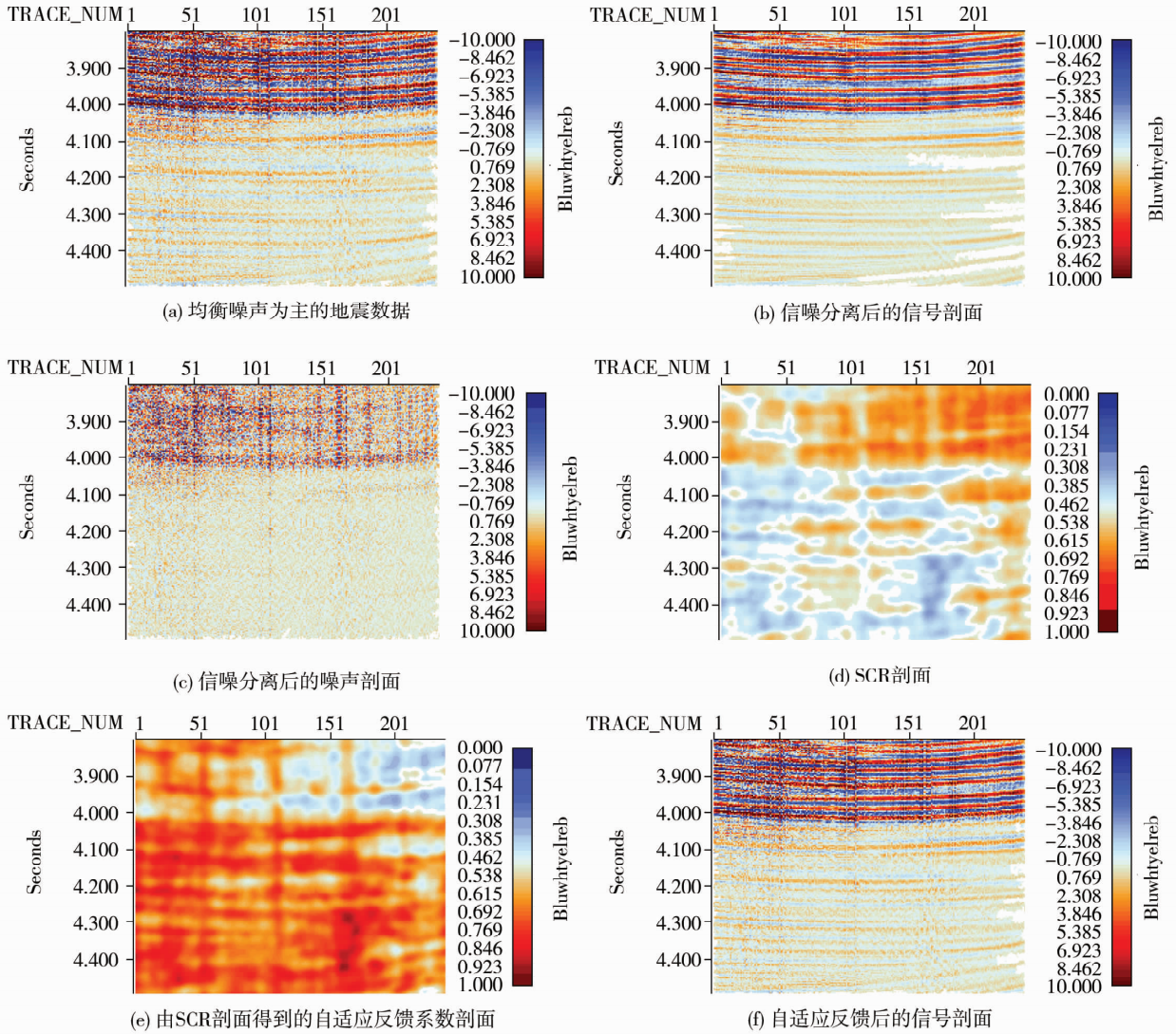


图 3 均衡噪声衰减过程

Fig. 3 The process of attenuating balanced noise

3 结 论

文中采用两步法噪声衰减策略，首先衰减非均衡噪声，然后衰减均衡噪声。对非均衡噪声建立指示因子 NCR 评估分离噪声的可靠性，对均衡噪声建立指示因子 SCR 评估分离信号的可靠性。根据 NCR 和 SCR 自动调整噪声反馈系数。当反馈系数接近于 1 时，表明该样点处信噪分离的可靠性较低，噪声剖面中的噪声为真实噪声的可能性较低，该样点处的噪声将以较大的权重加回到信号中。当反馈系数接近于 0 时，表明该样点处信噪分离的可靠性较高，噪声剖面中的噪声为真实噪声的可能性较高，该样点处的噪声将以较小的权重加回到信号中。数据示例表明方法具有较好的效果。

参考文献：

[1] CHOO J, SUDHAKAR V. A new seismic processing technique to LIFT noise and multiple [C]// CSPG Expand abstracts. Calgary: CSEG/ CSPG Joint National Convention, 2003.

[2] 张之涵, 孙成禹, 姚永强, 等. 三维曲波变换在地震资料去噪处理中的应用研究 [J]. 石油物探, 2014, 53 (4): 421 - 430.

ZHANG Z H, SUN C Y, YAO Y Q, et al. Research on the application of 3D curvelet transform to seismic data denoising [J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2014, 53 (4): 421 - 430.

[3] 姚恒星, 谢凯. 基于曲波变换的面波去噪方法研究 [J]. 长江大学学报 (自然科学版), 2015, 12 (7): 5 - 8.

YAO H X, XIE K. A seismic data denoising based on curvelet transform [J]. Journal of Yangtze University

- (Natural Science Edition), 2015, 12(7): 5-8.
- [4] 王姣, 李振春, 王德营. 基于 CEEMD 的地震数据小波阈值去噪方法研究[J]. 石油物探, 2014, 53(2): 164-172.
WANG J, LI Z C, WANG D Y. A method for wavelet threshold denoising of seismic data based on CEEMD[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2014, 53(2): 164-172.
- [5] 李先苦, 谢凯, 李纪成, 等. 一种基于轮廓波变换的高效率去噪算法研究[J]. 长江大学学报(自然科学版), 2015, 12(28): 16-20.
LI X K, XIE K, LI J C, et al. An efficient denoising algorithm based on contourlet transform[J]. Journal of Yangtze University(Natural Science Edition), 2015, 12(28): 16-20.
- [6] 王维强, 杨国权. 基于 EMD 与 ICA 的地震信号去噪技术研究[J]. 石油物探, 2012, 51(1): 19-30.
WANG W Q, YANG G Q. Random noise denoising technique based on EMD and ICA[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2012, 51(1): 19-30.
- [7] 刘成明, 王德利, 王通, 等. 基于 Shearlet 变换的地震随机噪声压制[J]. 石油学报, 2014, 35(4): 692-699.
LIU C M, WANG D L, WANG T, et al. Random seismic noise attenuation based on the Shearlet transform[J]. Acta Petrolei Sinica, 2014, 35(4): 692-699.
- [8] 刘伟, 曹思远, 崔震. 基于压缩感知和 TV 准则约束的地震资料去噪[J]. 石油物探, 2015, 54(2): 180-187.
LIU W, CAO S Y, CUI Z. Random noise attenuation based on compressive sensing and TV rule[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2015, 54(2): 180-187.
- [9] 张孝珍, 董汉强, 侯国文, 等. 地震勘探中的去噪技术新进展[J]. 勘探地球物理进展, 2009, 32(3): 172-179.
ZHANG X Z, DONG H Q, HOU G W, et al. Advances in denoising technology in seismic exploration[J]. Progress in Exploration Geophysics, 2009, 32(3): 172-179.
- [10] 张宝金, 成谷, 王云专, 等. 去噪强度、去噪效率与振幅保真[J]. 石油地球物理勘探, 2002, 37(1): 1-5.
ZHANG B J, CHENG G, WANG Y Z, et al. Intensity and efficiency of noise attenuation and amplitude fidelity[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2002, 37(1): 1-5.
- [11] 刘洋, 李承楚. 地震资料信噪比估计的几种方法[J]. 石油地球物理勘探, 1997, 32(2): 257-262.
LIU Y, LI C C. Some methods for estimating the signal-to-noise ratio of seismic data[J]. Oil Geophysical Prospecting, 1997, 32(2): 257-262.
- [12] 李庆忠. 走向精确勘探的道路——高分辨率地震勘探系统工程剖析[M]. 北京: 石油工业出版社, 1994.
LI Q Z. The way to obtain a better resolution in seismic prospecting—a systematical analysis of high resolution seismic exploration[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1994.