

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2019.087>



琼东南盆地深水区频率域油气检测技术研究及应用

刘仕友, 孙万元, 邓勇, 廖键, 汪锐

中海石油(中国)有限公司湛江分公司, 广东湛江 524057

摘要: 随着琼东南盆地勘探扩展到深水区勘探, 勘探面临较大的水深差异的影响。不同目标含油气评价受制于埋深、水深差异影响, 振幅属性可比性差; 仅用振幅类属性, 比如亮点技术、反演技术, 识别油气具有较大局限。以双相介质理论为基础, 探究双相介质条件下含油气层地震波特征, 发现含油气层的强衰减造成地震主频向低频移动的现象。应用匹配追踪和高分辨率Wigner分布时频分析方法, 精确分析地震波经过含油气层前后频谱差异, 应用频移特征属性进行含油气检测, 在琼东南盆地深水区勘探取得较好的应用效果, 同时, 该技术不依赖于测井数据等因素, 具有极大的推广应用前景。

关键词: 双相介质; 频移; 时频分析; 深水区; 烃类检测; 石油地质。

中图分类号: P588

文章编号: 1000-2383(2019)08-2603-06

收稿日期: 2019-01-16

Research and Application of Oil and Gas Detection Technology in Frequency Domain in Deep Water Area of Qiongdongnan Basin

Liu Shiyu, Sun Wanyuan, Deng Yong, Liao Jian, Wang Rui

Zhanjiang Branch Company of CNOOC (China) Ltd., Zhanjiang 524057, China

Abstract: With the extension of exploration in Qiongdongnan(QDN) Basin to deep water area, the seismic data amplitude is poorly preserved due to the large variation of water depth and the influence of spherical diffusion compensation, etc. The evaluation of oil and gas in different targets is affected by the difference of burial depth and water depth, and the analogy of amplitude attribute is poor. There are so many limitations in hydrocarbon detection only by bright spots technique. This paper is based on the theory of dual-phase medium. The seismic wave characteristics of oil and gas bearing reservoirs are explored. The strong attenuation of oil and gas reservoirs causes the seismic main frequency from high frequency to low frequency. Time-frequency analysis is using matching pursuit and high resolution Wigner distribution. Through accurate analysis of seismic wave spectrum difference before and after passing through oil and gas reservoirs, and application of main frequency shift characteristic attributes for oil and gas detection is obtained. Good exploration effect in deep water area of QDN Basin is achieved. At the same time, the technique does not depend on logging data and other factors, so it has great application prospects.

Key words: dual-phase medium; frequency shift; time-frequency analysis; deepwater; hydrocarbon detection; petroleum geology.

0 引言

琼东南盆地位于中国南海北部大陆边缘, 北接海南岛、神狐隆起, 南接永乐隆起, 西连莺歌海盆地

(图1), 盆地面积大、区域广, 水深变化幅度大(100~2 000 m), 属新生代时期受NNW-SSE拉张应力影响形成的断陷盆地, 伴生典型的地堑与半地堑构造(董晓芳等, 2018)。业界对深水区勘探主要

基金项目: 国家重大专项: 琼东南盆地深水区大中型气田形成条件与勘探关键技术(No. 2016ZX05026-02)。

作者简介: 刘仕友(1982-), 高级工程师, 主要从事储层预测和烃类检测研究, ORCID: 0000-0003-4017-9634. E-mail: liushy4@cnooc.com.cn

引用格式: 刘仕友, 孙万元, 邓勇, 等, 2019. 琼东南盆地深水区频率域油气检测技术研究及应用. 地球科学, 44(8):2603-2608.

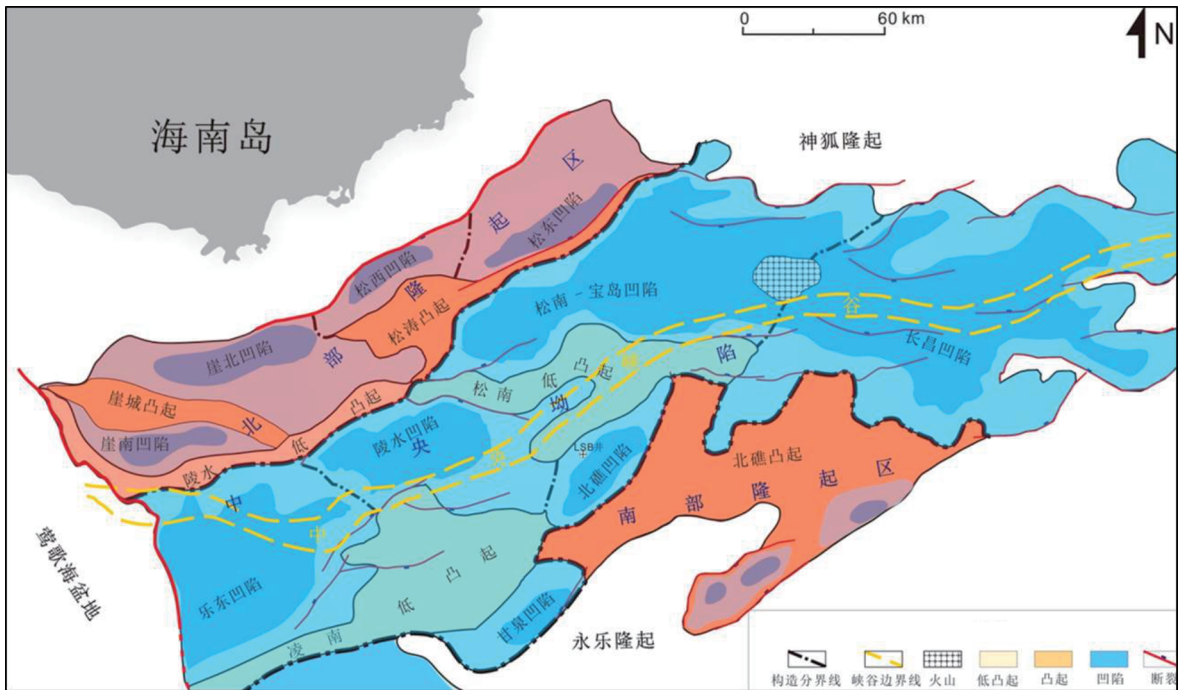


图1 琼东南盆地构造
Fig. 1 Structural map of QDN Basin

是指水深大于 300 m 的海域进行的石油勘探,琼东南盆地深水区主要在二号断裂带以南区域,包括乐东凹陷、陵水凹陷、北礁凹陷、松南凹陷、宝岛凹陷、文昌凹陷以及陵南低凸起、松南低凸起等构造。

琼东南盆地乐东—陵水凹陷经钻井证实为富生烃凹陷(甘军等,2018),具有巨大的勘探潜力,依靠亮点技术成功在中央峡谷水道成功发现陵水 17-2 等气田(李增学等,2018;尤丽等,2018)。然而,随着勘探的进一步深入,受深层高温高压、坡折带水深变化、地震资料拼接以及处理因素等影响,以亮点技术为代表的振幅类属性在油气评价中存在较大局限。多口钻井钻遇地震亮点多为灰岩或水层储层,且亮点特征的目标数量有限,发展一种不依赖于振幅属性的油气评价技术显得尤为重要。

1 基于双相介质的频移理论

地震波由振幅、频率、相位即可完整描述,发展非振幅类属性即从频率域或者相位域方向展开研究,前人针对地震波频率域衰减特性进行油气检测开展较多研究(Matheney and Nowack,1995;李红星等,2009;李勇,2010;孙万元等,2011;Zhang *et al.*, 2011),衰减算法原理多样,增加了很多不确定性,直接应用频率信息进行油气检测既可降低多解性

又提高可靠度。

为模拟地震波经过含油气层段响应特征,已发展了弹性波场理论、粘弹性波场理论、双相介质理论(Gassmann, 1951;Biot, 1956)等,考虑地下含油气储层岩石骨架、孔隙流体并存情况,本文中采用双相介质理论进行波场模拟,建立储盖组合模型,分析单炮地震波场特征及地震记录振幅—频率特征。图 2a 为正演模型,泥岩盖层有效孔隙极低、连通性差,可以视为单相介质,储层段孔隙度较好、连通性强,可以视为双相介质,以 40 Hz 雷克子波进行模拟,获取地震记录(图 3)并提取 300 ms 波场快照(图 2b、2c)。从固相波场快照中可以看出:在单相介质区域有直达纵波(P)、反射第一纵波(R_{PP1})、反射横波(R_{PS})、反射第二纵波(R_{PP2})能量弱,在双相介质区域有透射纵波(T_{PP1})、透射横波(T_{PS})、透射第二纵波(T_{PP2});流相波场快照显示(图 2c),单相介质不存在流相波场,双相介质中流相主要有透射纵波(T_{PP1})、透射横波(T_{PS})、透射第二纵波(T_{PP2})。排布在单相介质中检波点获得地震记录主要有直达纵波、反射纵波、反射横波。流体相与第二纵波势必影响地震信号能量、影响地震频谱。

在海洋地震数据采集中,拖缆检波器只能接收到纵波,基于此,对模拟地震记录进行波场分离,分析双相介质界面地震波能量、频率特征。从图 4 中

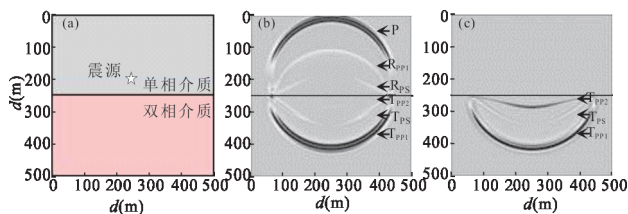


图 2 双相介质波场模拟

Fig. 2 simulation of dual-phase medium

a. 正演模型; b. 固相波场快照; c. 流相波场快照

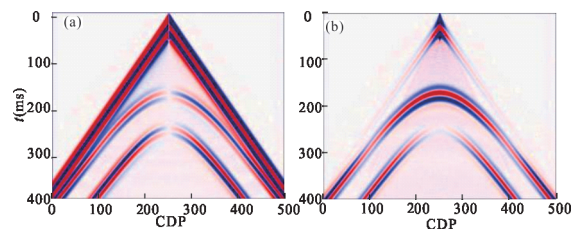


图 3 双相介质地震波特征

Fig. 3 Seismic wave characteristics of dual-phase medium

a. 横向分量; b. 纵向分量

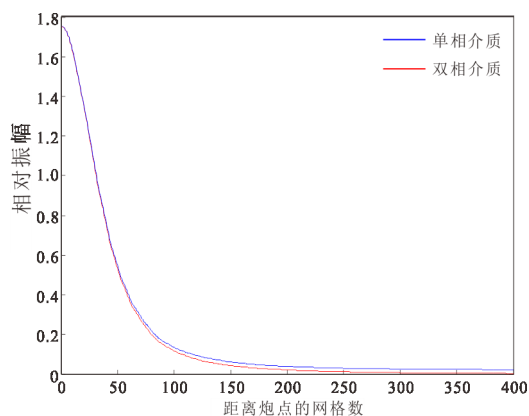


图 4 双相介质与单相介质地震波能量特征对比

Fig. 4 Comparison of seismic wave energy characteristics between dual-phase and single-phase media

可以看出双相介质反射纵波能量明显低于球面扩散能量基线,此差异可以确定为双相介质内流体引起的衰减.由于双相介质流体相引起地震波能量的衰减异常,其亦可在地震波的频率域存在一定的表现.分析激发子波频谱与接收纵波频谱进行对比(图 5),图中点线图接收的反射纵波的地震记录的频谱,通过和原始子波的频谱比较可以发现,频谱向低频移动明显.

2 基于匹配追踪的 Wigner 分布

自傅里叶提出频谱分析建立经典频谱分析积

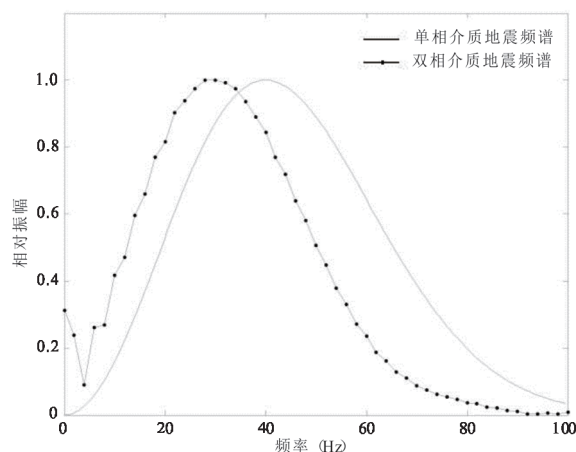


图 5 双相介质地震波频谱特征

Fig. 5 Spectrum characteristics of seismic waves in dual-phase media

红色: 双相介质; 蓝色: 单相介质; 点线: 双相介质地震频谱; 直线: 子波频谱

分公式,前人进行发展努力获得精确时频特征,发展短时傅立叶变换、小波变换、S 变换、匹配追踪等时频分析算法 (Griffin and Lim, 1984; Daubechies, 1990; Mallat and Zhang, 1993; Stockwell, 1996), 它们往往具有局部分析能力不足,或算法计算量大等缺点.本文中应用匹配追踪算法较传统匹配追踪算法增加了对匹配原子的扩张、平移、调制,增加了匹配的相关度,减少了匹配的次数,降低了运算量;同时,通过 Wigner 变化求取的信号能量分布和能量密度分布对比传统匹配追踪对匹配原子的再次时频分析大大减少了运算量,并且提高了匹配原子时频谱的分辨率.

对于任意信号 $f(t) \in L^2(R)$ 可以分解为:

$$f(t) = \sum_{n=0}^{+\infty} \langle R^n f, g_{\gamma_n} \rangle g_{\gamma_n}, \quad (2-1)$$

其中: g_{γ_n} 为第 n 次匹配因子, $R^n f$ 为第 n 次匹配余项, $\gamma_n = (s_n, u_n, \xi_n)$ 是 s_n, u_n, ξ_n 的函数分别为尺度参数、位移参数、频率相位参数且满足 $g_{\gamma_n} =$

$$\frac{1}{\sqrt{s_n}} g\left(\frac{t - u_n}{s_n}\right) e^{i\xi_n t} \text{ 为最佳匹配余项, 从 Wigner 分布}$$

的著名扩张和平移特性和时频原子的表达式,对于任一信号有:

$$W[f, f](t, \omega) =$$

$$\frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} f\left(t + \frac{\tau}{2}\right) f^*\left(t - \frac{\tau}{2}\right) e^{-i\omega\tau} d\tau. \quad (2-2)$$

所以对于 Wigner 分布有:

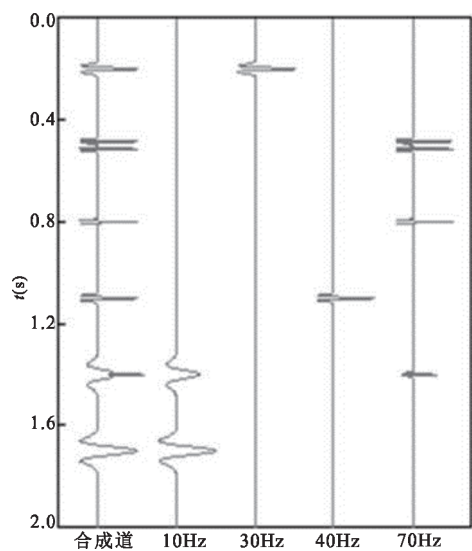


图6 合成地震记录

Fig. 6 The synthetic seismogram

$$W_{g_{\gamma}}(t,\omega)=W_g\left[\frac{t-u}{s},s(\omega-\xi)\right].\quad (2-3)$$

因此去掉交叉项后信号的时频平面分布为：

$$Ef(t,\omega)=\sum_{n=0}^{+\infty}\left|\left\langle R^nf,g_{\gamma_n}\right\rangle\right|^2W_g\left[\frac{t-u_n}{s_n},s_n(\omega-\xi_n)\right].\quad (2-4)$$

此分布也满足能量密度特性,获得高分辨率时频谱即可进行属性提取。

为验证匹配追踪 Wigner 时频分析方法的时间、频率分辨率,设计如图 6 所示 8 个理论 Ricker 子波具有不同的时移特征、振幅能量、主频信息,通过叠加合成地震记录,对合成地震记录分别进行短时傅立叶变换、小波变换和匹配追踪 Wigner 分布时频谱分析(图 7)。从时间分辨率来看,短时傅立叶变换对较小时移子波分辨率最低,小波变换对比低频信号能量时间分辨率较差、频率分辨率较强,高频能量时间分辨率较强、频率分辨率较差,匹配追踪 Wigner 分布同时具有较高时间和频率分辨率,为精准频率域信息的提取奠定了基础。

3 频移特征在油气检测中的应用

如前文所述,地震波经过含油气层后地震波能量存在高频衰减和低频共振的特征,表现为地震波主频向低频方向移动,基于此理论即可进行含油气检测。琼东南盆地 L2 探区, L2-1 探井钻遇厚层,其顶底反射地震轴完全分开,可以明确分析含气储层顶底时频谱差异。图中时频谱可以明显看出(图 8),

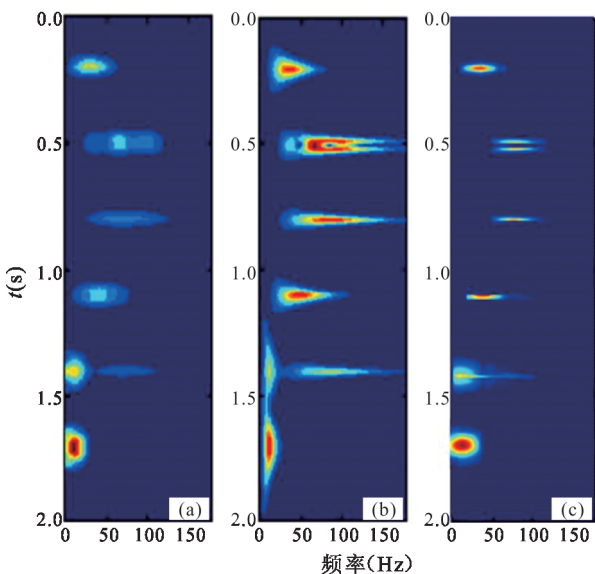


图7 不同方法时频谱分析对比

Fig. 7 Comparison of different time-frequency spectrum analysis methods.

a. 短时傅里叶变换时频谱; b. 小波变换时频谱; c. 匹配追踪 Wigner 分布时频谱

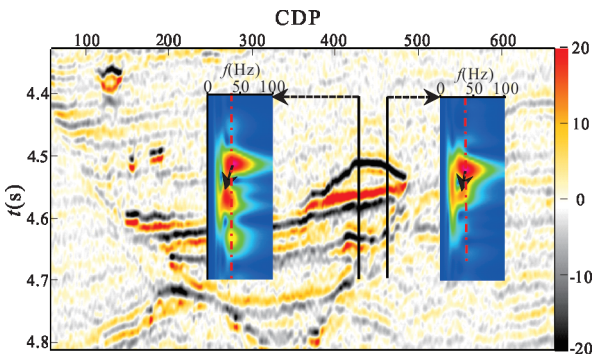


图8 含气层顶底界面时频谱

Fig. 8 Time-frequency spectrum of top-bottom interface of gas-bearing formation

地震主频在 40 Hz 左右,经过含气层后,气藏底界面频谱主频约为 30 Hz(图 5 中箭头所指),主频移动明显,证明基于双相介质理论的衰减造成的频移进行含油气预测的可行性。

根据这一特性,按照砂体展布顶底界面(图 9a, 顶:红色,底:蓝色)提取剖面瞬时主频特征(图 9b),从图中可以看出储层顶底界面主频存在较大差异,将储层顶、底界面主频特征差异即可反应油气特征,从图 9d 中可以看出,含气部位具有较强的频移特征(图 9c),而含水部位频移特征几乎没有,实例验证该方法的有效性。

在琼东南盆地 L5 区的勘探中,在 S 块区已钻

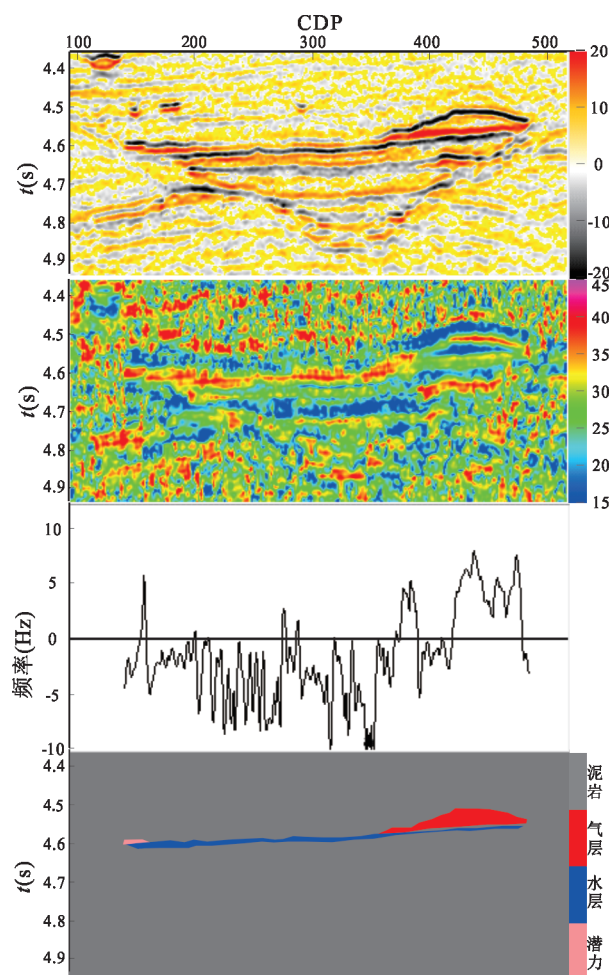


图9 主频偏移特征

Fig.9 Main frequency shift characteristics

a. 纯波地震剖面; b. 主频剖面; c. 频移特征

S1井,获得较好的油气发现,探区N块振幅明显弱于S块(图10b),应用亮点属性评价该区勘探风险较大.而通过应用本文技术方法,提取频移属性进行分析(图10a),从属性图中可以看出,北块与南块异常相当,且异常范围边界清晰,与构造吻合度高,推测北块目标具有较大的勘探潜力.在该区部署N5井实钻高饱和度气层,根据气组高度和构造特征,含气范围边界与预测边界基本一致,证实该技术方法的有效性.

4 结论

深水区勘探是当今油气勘探的主要方向,应用频率域信息油气检测技术,可以较好的实现消除不同水深对地震振幅的影响,本文提出的基于主频变化的油气检测技术将在以后的油气勘探中发挥重要作用.

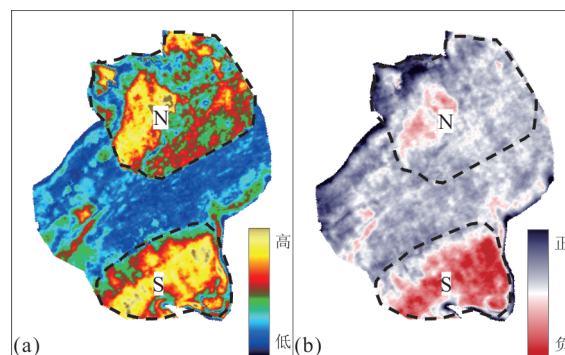


图10 琼东南L5探区频移、振幅特征对比

Fig.10 Application of main frequency shift in a exploration area in QDN

a. 频移特征; b. 振幅特征

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

- Biot, M. A., 1956. Theory of Propagation of Elastic Waves in a Fluid - Saturated Porous Solid. I. Low - Frequency Range. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 28(2): 168-178. <https://doi.org/10.1121/1.1908239>
- Daubechies, I., 1990. The Wavelet Transform, Time - Frequency Localization and Signal Analysis. *IEEE Transactions on Information Theory*, 36(5): 961-1005. <https://doi.org/10.1109/18.57199>
- Dong, X. F., Qu, X. Y., You, L., et al., 2018. Provenance Analysis of the Canyon Channel Fillings of Huangliu Formation in the Ledong-Lingshui Sag. *Marine Geology Frontiers*. 34(10): 12-22(in Chinese with English abstract).
- Gan, J., Zhang, Y. Z., Liang, G., et al., 2018. On Accumulation Process and Dynamic Mechanism of Natural Gas in the Deep Water Area of Central Canyon, Qiongdongnan Basin. *Acta Geologica Sinica*, 92(11): 2359-2367(in Chinese with English abstract).
- Gassmann, F., 1951. Elastic Waves through A Packing of Spheres. *Geophysics*, 16(4): 673-685. <https://doi.org/10.1190/1.1437718>
- Griffin, D., Lim, J., 1984. Signal Estimation from Modified Short-Time Fourier Transform. *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, 32(2): 236-243. <https://doi.org/10.1109/tassp.1984.1164317>
- Li, H. X., Tao, C, H., Zhou, J. P., et al., 2009. Analysis on Velocity and Attenuation Feature of Wavefield in Biphasic Anisotropic Medium. *Oil Geophysical Prospecting*, 44(4): 457-465(in Chinese with English abstract).

- Li, Y., Chen, H. D., Xu, D., et al., 2010. Hydrocarbon Detection Methods Based on Dual Phase Media Theory and Its Applications. *Journal of Southwest Petroleum University(Science & Technology Edition)*, 32(3): 1–5 (in Chinese with English abstract).
- Li, Z. X., Song, G. Z., Wang, D. D., et al., 2018. Characteristics of (Fan) Braided River Delta in Oligocene Coal Measures of Qiongdongnan Basin. *Earth Science*, 43(10): 3471–3484 (in Chinese with English abstract).
- Mallat, S. G., Zhang, Z. F., 1993. Matching Pursuits with Time - Frequency Dictionaries. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 41(12): 3397–3415. <https://doi.org/10.1109/78.258082>
- Matheney, M. P., Nowack, R. L., 1995. Seismic Attenuation Values Obtained from Instantaneous-Frequency Matching and Spectral Ratios. *Geophysical Journal International*, 123(1): 1–15. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246x.1995.tb06658.x>
- Stockwell, R. G., Mansinha, L., Lowe, R. P., 1996. Localization of the Complex Spectrum: The S Transform. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 44(4): 998–1001. <https://doi.org/10.1109/78.492555>
- Sun, W. Y., Zhang, H. X., Du, Y. K., 2011. Matching Trace Time-Frequency Analysis and Its Application in Oil Gas Detection. *Journal of Shandong Univ. of Sci. and Technol.: Nat. Sci.*, 30(4): 51–57 (in Chinese with English abstract).
- You, L., Zhong, J., Zhang, Y. Z., et al., 2018. Petrography-Geochemistry and Source Significance of Western Canyon Channel of Northern South China Sea. *Earth Science*, 43(2): 514–524 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, H. X., He, B. S., Jiang, X. D., 2011. Utilizing Morlet Spectral Decomposition to Detect Oil and Gas. *Computer Science for Environmental Engineering and Eco Informatics Communications in Computer and Information Science*, 159: 293–298. https://doi.org/10.1007/978-3-642-22691-5_51

附中文参考文献

- 董晓芳, 曲希玉, 尤丽, 等, 2018. 乐东—陵水凹陷古近系黄流组峡谷水道碎屑岩的源区分析. *海洋地质前沿*, 34(10): 12–22.
- 甘军, 张迎朝, 梁刚, 等, 2018. 琼东南盆地深水天然气成藏过程及动力机制研究. *地质学报*, 92(11): 2359–2367.
- 李红星, 陶春辉, 周建平, 等, 2009. 双相各向异性介质中波场速度与衰减特征分析. *石油地球物理勘探*, 44(4): 457–465
- 李勇, 陈洪德, 许多, 等, 2010. 基于双相介质理论的油气检测方法及应用研究. *西南石油大学学报(自然科学版)*, 32(3): 1–5.
- 李增学, 宋广增, 王东东, 等, 2018. 琼东南盆地渐新统煤系(扇)辫状河三角洲特征. *地球科学*, 43(10): 3471–3484.
- 孙万元, 张会星, 杜艺可, 2011. 匹配追踪时频分析方法在油气检测中的应用. *山东科技大学学报(自然科学版)*, 30(4): 51–57
- 尤丽, 钟佳, 张迎朝, 等, 2018. 南海北部中央峡谷水道的岩相—地球化学特征及其源区性质. *地球科学*, 43(2): 514–524.