

歧口凹陷古近系超深气藏烃类检测方法

洪忠¹,张猛刚¹,刘化清¹,苏明军¹,袁淑琴²

(1. 中国石油勘探开发研究院西北分院,甘肃兰州730020; 2. 中国石油大港油田公司勘探开发研究院,天津300280)

摘要:近几年来,歧口凹陷古近系超深层天然气勘探呈可喜态势。然而,目前还没有针对该地区超深层天然气藏的地震响应总结与之相匹配的天然气检测技术研究,制约了超深层天然气勘探的进程。为满足扩大勘探的要求,根据超深气藏在频率域所表现的“低频共振,高频衰减”的典型响应特点,对比研究不同的频谱分解方法。同时,根据研究区超深层天然气储层发育特点,应用瞬态子波吸收技术及振幅频率比属性等方法来预测含气层段和边界。结果表明:频谱分解方法是检测含气异常的基础,通过选择时间大小约2倍于地震记录子波两波谷间平均距离的Hanning时间窗函数,进行短时傅氏变换。该方法适用于检测含气储层低频异常,并可获得较高的时频分辨率。烃类检测方法应用结果与新近部署探井的超深层气藏分布吻合,证明了该套方法预测厚含气储层的有效性,为歧口凹陷深层天然气的扩大勘探提供了有力的技术保障。

关键词:窗函数;频谱分解;烃类检测;超深层气藏;歧口凹陷

中图分类号:TE135

文献标识码:A

Hydrocarbon detection methods for the Paleogene ultra-deep gas reservoirs in the Qikou Sag

Hong Zhong¹, Zhang Menggang¹, Liu Huaqing¹, Su Mingjun¹, Yuan Shuqin²

(1. Northwest Branch of Research Institute of Exploration & Development, PetroChina, Lanzhou, Gansu 730020, China;

2. Exploration & Development Research Institute, PetroChina Dagang Oilfield Company, Tianjin 300280, China)

Abstract: In recent years, exploration of the Paleogene ultra-deep gas reservoirs in the Qikou Sag has been fruitful. Yet no researches have been performed on the seismic response features of these gas reservoirs and relevant gas detection techniques, impeding exploration to some degree. In an attempt to solve these problems, a comparative study on various spectral decomposition methods was performed according to the typical frequency domain responses of the ultra-deep gas reservoirs, i. e. high-frequency attenuation and low-frequency resonance. In addition, according to the features of the ultra-deep gas reservoirs, instantaneous wavelet absorption and amplitude to frequency ratio attribute were employed to detect gas-bearing intervals and their boundaries. The result shows that the spectral decomposition method is the basis of abnormal gas-bearing reservoir detection. The Short Time Fourier Transformation through Hanning time function with a time window length being two times of average distance between two through of seismic wavelets is suitable for detecting low-frequency abnormality of gas reservoir with high resolution both in time and frequency domains. The results of gas detection with these techniques match the drilling results of the new exploratory wells, verifying the effectiveness of these methods in ultra-deep gas reservoir detection in the Qikou Sag.

Key words: window function, spectral decomposition, hydrocarbon detection, ultra-deep gas reservoir, Qikou Sag

1 地质概况

歧口凹陷位于渤海湾盆地黄骅坳陷中北部,是黄骅坳陷最富集天然气的地区^[1]。过去以3 500~4 500 m中深层为主要勘探目标(图1a),已探明天然气主要分

布在沙河街组一段下亚段和奥陶系(图1b)^[2]。近年来,随着认识的不断深入和勘探进程的加快,相继部署了一系列埋深大于4 500 m的超深钻井,其中歧深1井、歧深6井、滨深22井和滨海4井均在古近系深层天然气勘探中取得了很好的勘探成效^[3],预示着歧口凹陷超深层天然气具有广阔的勘探前景,有望形成大

收稿日期:2012-08-07;修订日期:2013-06-27。

第一作者简介:洪忠(1985—),男,工程师,地震解释及储层预测。E-mail: hongzhong_go@petrochina.com.cn。

基金项目:中国石油天然气股份有限公司“歧口富油气凹陷大油气田勘探及综合配套技术研究”项目(2008-030504)。

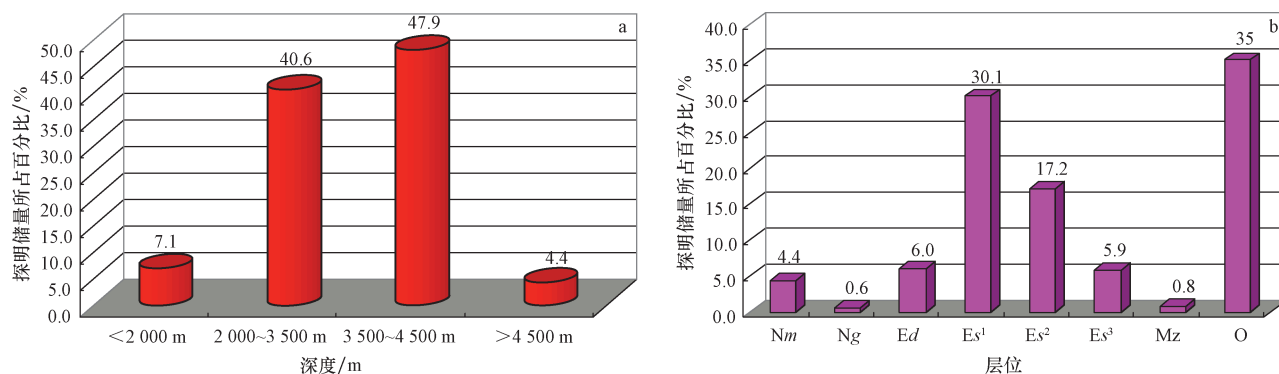


图1 歧口凹陷天然气探明储量统计分布

Fig. 1 Statistics of the proved natural gas reserves in the Qikou Sag

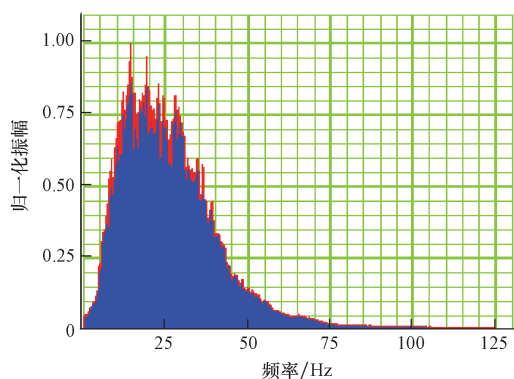


图2 过歧口凹陷某超深井中、深层段地震剖面频谱

Fig. 2 Spectrum map of a seismic section tied to the mid-deep intervals in an ultra-deep well in the Qikou Sag

气田或中小气田群。

研究区位于面积达 5 280 km² 的三维连片地震数据体覆盖区之内。经振幅保真处理,反射波的频率(尤其是低频段)、相位、振幅和有效频宽得以最大程度的保留。中深层地震资料品质较好,频带齐全、高低频信息不失真、信噪比高,为超深层天然气储层地震预测奠定了基础(图2)。然而,目前还没有针对研究区含气储层地震响应特点的总结及烃类检测技术的系统研究,满足不了超深层天然气扩大勘探的技术需求。因此,开展烃类检测技术研究为超深层天然气勘探提供有力地球物理依据,减小勘探风险具有重要意义。

2 烃类检测技术

地震波在地下传播时,振幅强度(A ,无量纲)可表达为:

$$A = A_0 e^{-\alpha r} \quad (1)$$

式中: A_0 为初始振幅,无量纲; r 为传播距离,m; α 为地层有效吸收系数,无量纲; f 为地震波频率,Hz。通常地层含有油气时,地层吸收系数 α 会增大。由公式可以看到,振幅能量同频率成反比,即如果除去地震波传播距离的原因,当地层含有油气时,地震波高频能量的

散失高于低频段能量,呈现“高频衰减”现象。同时,大量实践证明^[4-17],地震波在含油气介质中传播时,特别是在含气储层中,会发生衰减现象,并且在频率域上表现为“低频共振、高频衰减”的动力学特征。

研究区超深气藏由于大的埋深及含气效应,含气层段理论上应为典型的“高频衰减”特征。本次研究拟选用基于这一特征的含气检测方法,如时频分析、瞬时子波吸收、“甜点”属性等,开展超深层天然气检测工作。

2.1 时频分析方法对比

时频分析方法就是通过将地震时间域数据数学变换,实现从时频域角度对地震信号特征进行分解和描述。该方法最早由 Castagna 等人^[18]应用于油气检测中。时频分析方法是含气储层在频率域响应最直接的体现。当储层中流体为气体时,与含气层相对应的频谱道集表现为能量团向低频端的移动。常用的时频分析方法有短时傅氏变换、连续小波变换、广义 S 变换等。本次研究内容主要为短时傅氏变换,通过研究影响其应用效果的因素及对比其他时频分析算法,寻求最佳时频分辨率。

短时傅氏变换是一种常见时频分解方法,通过对信号加窗函数实现对时间的定位功能。代表性的窗函数有 Gauss 窗、Nuttall 窗、Hamming 窗及 Hanning 窗。为研究最佳的时频分析窗函数,建立位于 200, 400, 700 ms,单频分别为 10, 20, 50 Hz 的雷克子波作为合成记录。选取以上窗函数,并以时窗为 100 ms 对合成记录进行频谱分解。从结果(图3)可以看到,Gauss 窗和 Nuttall 窗对于高频能量的反映较 Hamming 窗和 Hanning 窗清晰,而在低频段 0~5 Hz 处出现了虚假能量,不如 Hamming 窗和 Hanning 窗对于低频能量反映的真实。因此,Gauss 窗和 Nuttall 窗适用于分析高频信号,而 Hamming 窗和 Hanning 窗适用于分析低频信号,即适用于分析低频段异常的含油气频谱分析。

现对比不同频谱分解方法应用效果,首先建立由雷克子波组成的地震合成记录,该合成记录由三个同

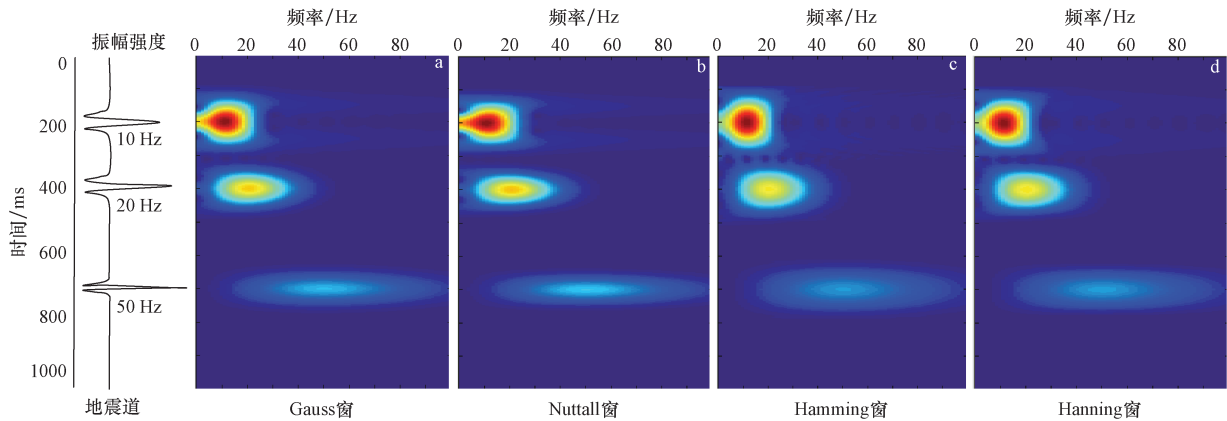


图3 不同窗函数短时傅氏频谱分解方法对比

Fig. 3 Comparison of the short-Fourier spectral decomposition methods with different window functions

相轴组成。第一个同相轴位于 200 ms 处,为单频为 20 Hz 的雷克子波;第二个同相轴位于 400 ms 处,为单频分别为 20 Hz 和 50 Hz 雷克子波的叠加;第三个同相轴位于 600 ms 处,由两个间隔为 40 ms 的单频为 40 Hz 的雷克子波组成。

短时傅氏频谱分析的分辨率与窗口大小的选择密切相关,窗口大小取决于子波的波长。子波两波谷间波长 $T = \sqrt{6} / (\pi f_M)$, 其中 f_M 为子波的主频, Hz。

经上式计算, 50 Hz 雷克子波两波谷之间的距离约为 16 ms, 40 Hz 约为 20 ms, 20 Hz 约为 40 ms。因此, 合成地震记录的平均子波波谷间距离约为 30 ms。由于 Hanning 窗适用于低频信号段的分析, 现分别选取 10 ms (小于合成记录子波波谷间的平均距离)、30 ms (约等于合成记录子波波谷间的平均距离)、60 ms (约两倍于合成记录子波波谷间的平均距离)、120 ms (远大于合成记录子波波谷间的平均距离) 的 Hanning 时间窗函数, 对合成记录进行短时傅氏分解。

同时, 加以应用连续小波和广义 S 变换的时频分析方法, 运算结果如图 4 所示。

由图 4 可以看到连续小波变换方法时间分辨率低, 不能有效区分 600 ms 处相邻很近的两个同相轴; 10 ms 和 30 ms Hanning 时窗分解结果频率分辨率低, 在 0 Hz 都有能量的分布, 即产生了虚假能量团; 120 ms Hanning 时窗分解结果虽频率分辨率较高, 但时间分辨率低; 只有广义 S 变换方法和 60 ms Hanning 时窗 (时窗大小等于合成记录子波波谷间的平均距离) 分解结果获得了最佳时频分辨率, 不但 600 ms 处两个同相轴能区分开, 同时对各同相轴的主频能量也反映的很精准。

2.2 瞬时子波吸收技术

通过求取信号谱的高频指数衰减系数来预测含油气性这一方法 (EEA 方法) 由 Mitchell 等^[19] (1996 年) 率先提出。该方法是在地震道上分时窗直接进行频谱分析 (图 5a), 计算异常高频能量衰减。由于反射记录

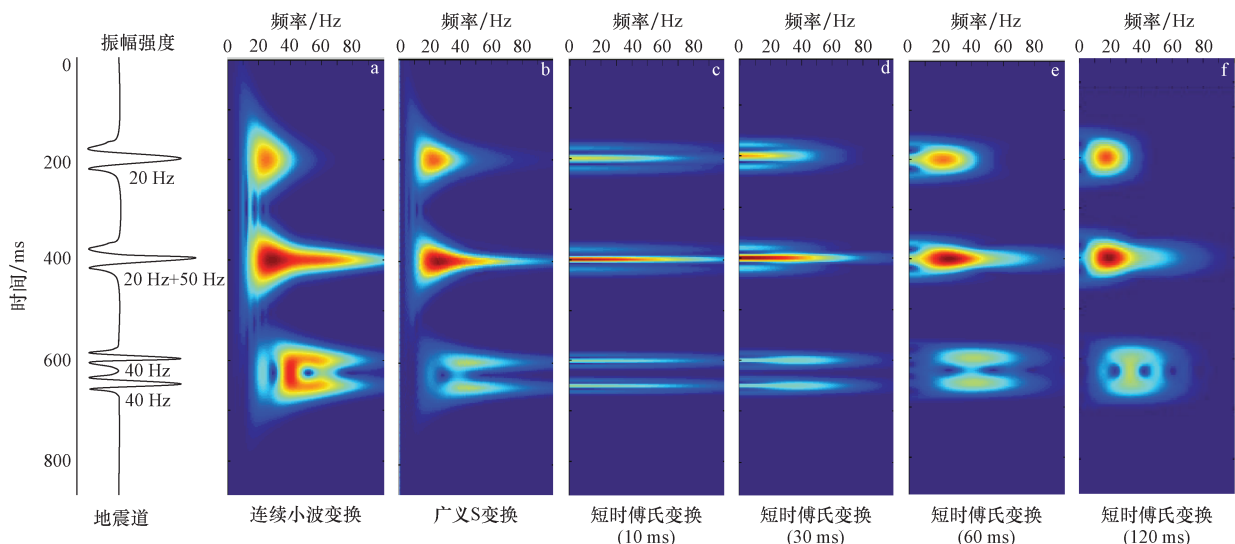


图4 不同频谱分解方法及不同时间窗基于 Hanning 窗函数的短时傅氏频谱分解方法对比

Fig. 4 Comparison of different spectral decomposition methods and the Hanning-window-function-based short-Fourier methods with different time windows

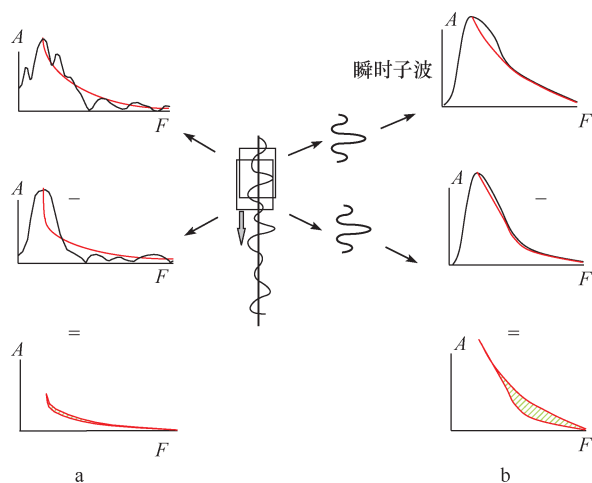


图5 瞬时子波吸收方法原理

Fig. 5 Principles of the instantaneous wavelet absorption method

频谱是子波与反射系数的褶积,因此 EEA 方法分析结果受反射系数的影响较大,精度低,而且多解性强。Lichman 等(2003 年)通过提取瞬时子波^[20](图 5b),分析瞬时子波高频振幅衰减情况,在复赛谱中实现了地震子波和反射系数的分离,从而排除了反射系数的影响,油气检测的精度得到了相应的提高。该技术适用于亮点型、低阻抗和Ⅲ类 AVO 异常含气储层的检测^[13]。

2.3 振幅频率比技术(“甜点属性”)

当地层中含有油气时,地震波的动力学参数会出现有效带宽能量增强、吸收系数加大、平均频率降低的现象,即“两高一低”特征^[21]。因此,储层含有油气后,“甜点”属性(瞬时振幅除以瞬时频率的平方根)表现为大的异常(图 6)。但由于地层的调谐作用,薄含气储层振幅频率比响应并不明显,高的振幅频率比常指示厚的含气储层。

3 应用实例

研究区位于歧口凹陷埕海地区,新近一口超深探

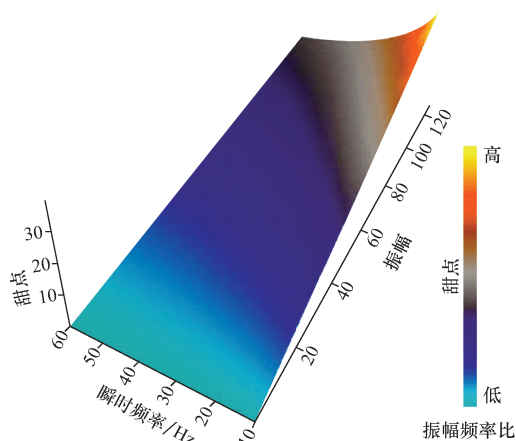


图6 振幅频率比方法原理

Fig. 6 Principles of the amplitude-to-frequency ratio attribute method

井在 4 564 ~ 4 574 m 处沙河街组一段获得工业气流,表明歧口超深层天然气勘探领域的又一突破。含气层段为一套 20 m 厚、低速、低密度砂岩(图 7)。本次研究拟采用时频分析、瞬时子波吸收、振幅频率比这 3 个具代表性的含气检测技术,针对研究区超深气藏开展含气储层检测方法验证工作。

过该超深探井含气目的层段地震资料主频为 24 Hz(图 2),所提取的子波两波谷间距离为 32 ms,因此采用 64 ms Hanning 时间窗函数进行短时傅氏变换。在图 8 中可以清晰的看到图中白线所示的地震波高频能量衰减现象。这说明由于厚气层的存在,地震波反射振幅能量集中在低频段上,高频段因衰减几乎无能量的分布。因此,地震频率的异常往往意味着岩性含油气的异常,时频分析方法可以很好的展示地震资料频率域特征。

图 9 为过该超深探井地震剖面的瞬时子波吸收属性,可以看到在同一位置含气储层表现为高吸收,这证实了含气储层表现为明显的地震波衰减特性,利用瞬时子波吸收技术可以有效的预测气层分布。

图 10 为过超深探井同一地震剖面的“甜点”属性,含气层段表现为红色高振幅频率比,从蓝色背景明

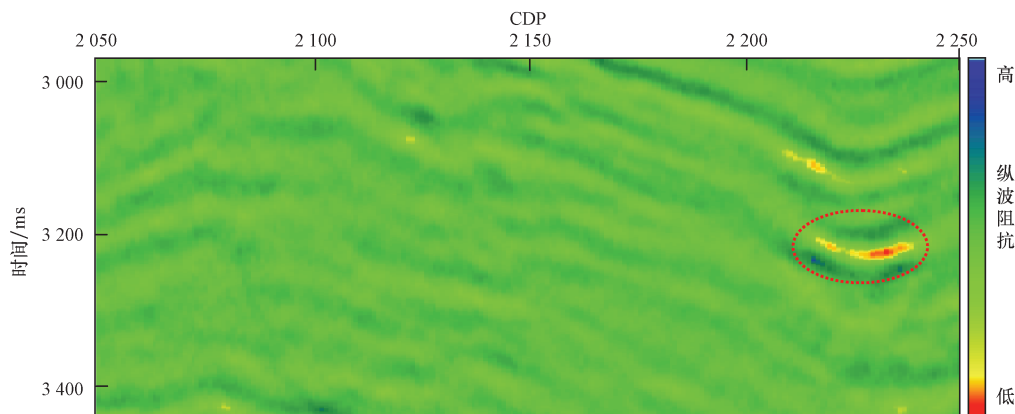


图7 过歧口凹陷埕海地区某超深探井纵波阻抗剖面

Fig. 7 P-wave impedance section crossing an ultra-deep well in Chenghai area, the Qikou Sag

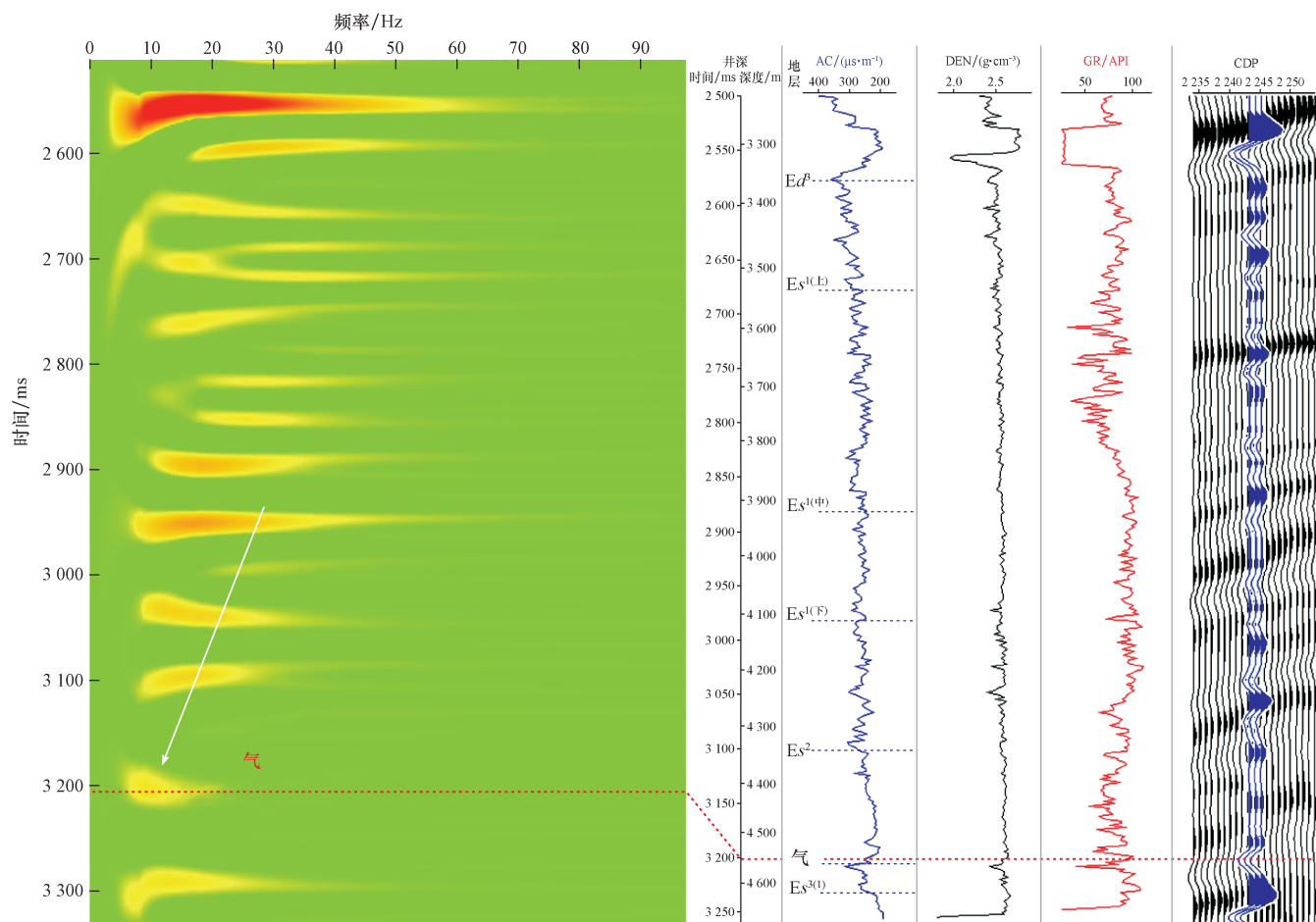


图8 歧口凹陷埕海地区某超深探井短时傅氏变换频谱分解(64 ms Hanning 窗函数)与测井资料对比
Fig.8 Comparison map of short-Fourier amplitude spectrum decomposition results(Hanning time window of 64 ms) of an ultra-deep well with its well logging data from Chenghai area,the Qikou Sag

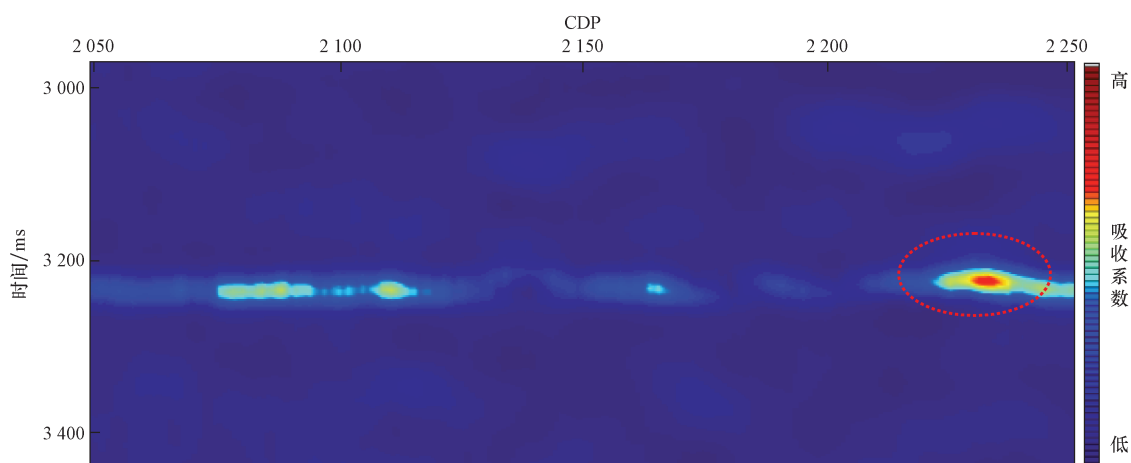


图9 过歧口凹陷埕海地区某超深探井瞬时子波吸收属性

显的区分开来。这进一步证实了厚含气储层为有效带宽能量增强、平均频率降低的特征。利用“甜点”属性可以有效地预测气层的分布。

4 含气检测多解性分析

含气性不是造成衰减现象的唯一原因,高速岩性、

薄互层综合地震响应、调谐现象的单一或者综合作用都可产生类似含气储层地震波衰减的现象,这就意味着仅仅应用烃类检测技术存在巨大的多解性和解释风险。

针对薄互层调谐效应设计正演模型。如图 11a 所示,在地质模型中,每个矩形为 5 m 厚的砂层,速度 4 100 m/s。砂层间的间隔为 5 m,从左往右薄互层总厚度逐渐加大;黄色泥岩背景速度为 3 500 m/s。选用

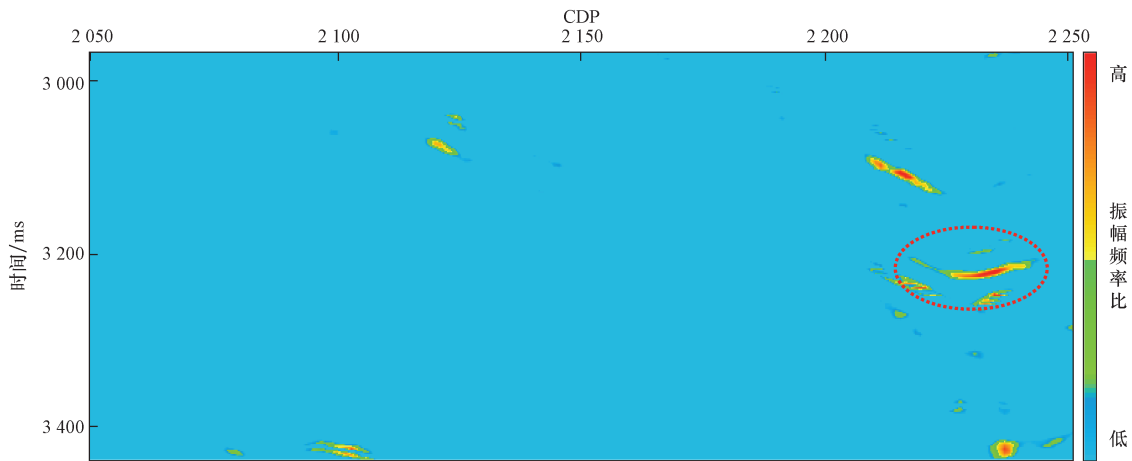


图 10 过歧口凹陷埕海地区某超深探井振幅频率比属性

Fig. 10 Amplitude to frequency ratio attribute section crossing an ultra-deep well in Chenghai area, the Qikou Sag

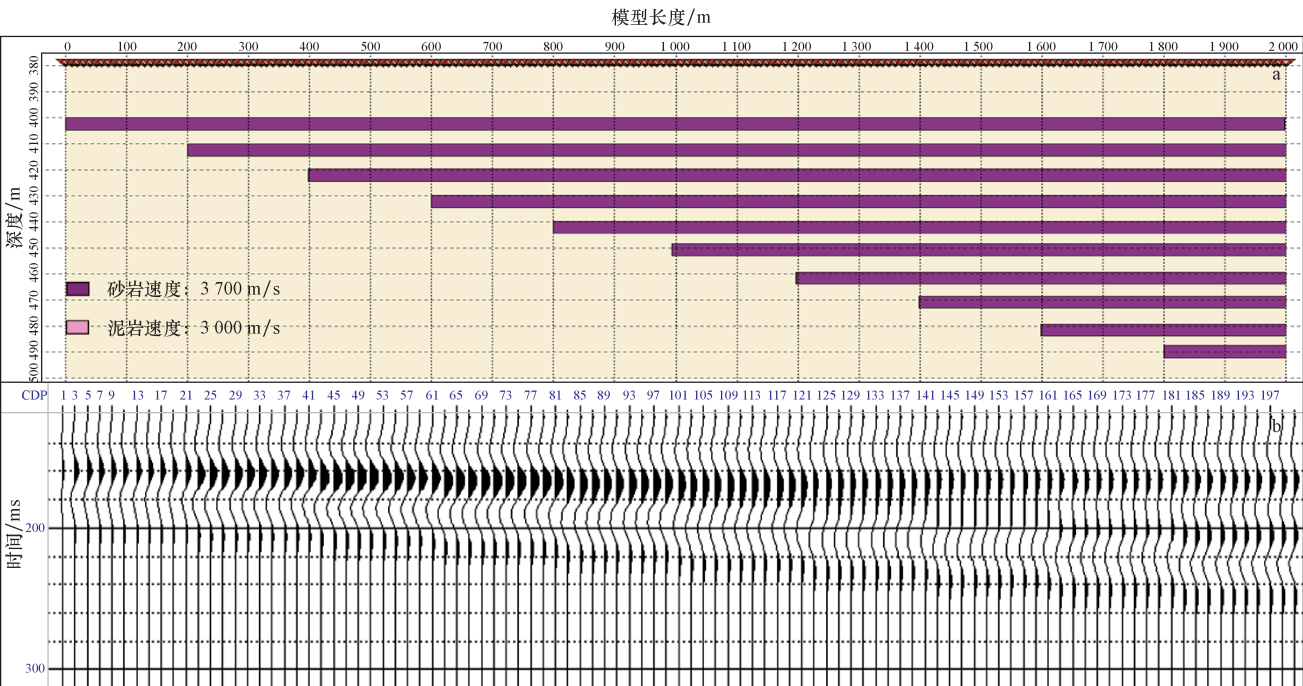


图 11 薄互层干涉地质模型及正演记录

Fig. 11 Geological model of thin-interbed interference and its forward modeling records

20 Hz雷克子波,对模型进行全波场数值模拟。从正演记录(图 11b)上可以看到,由于薄互层组的综合地震响应作用,顶界面地震反射经历了振幅强度由弱变强,然后变弱;频率由大变小,然后变大的过程。

运用小波变换方法对正演记录第 10 和第 130 道进行时频分析。第 10 道为 5 m 厚单砂层的地震响应。在时频域中(图 12a),5 m 厚单砂层的能量团集中在 22 Hz。经频谱扫描其主频为 22 Hz;第 130 道为 7 个 5 m 厚单砂层,砂层间的间隔为 5 m 的薄互层组综合地震响应。在其时频域中(图 12b),薄互层组的能量团集中在 15 Hz。经频谱扫描其主频为 15 Hz。由正演结果可知,薄互层组的综合地震响应也可表现为低频段能量的聚集。如果为砂层的垂向组合,则出现图 12 中蓝色箭头所示,类似于含气层高频能量衰减的趋势。

基于“低频共振、高频衰减”动力学特征的含油气检测方法会将薄互层组计算成含气层。

歧口凹陷古近系气藏波阻抗值低于围岩,可以通过有效反演锁定低波阻抗区域的含气吸收异常,从而排除由高速岩性造成吸收异常的影响。然而,如何排除薄互层综合响应和调谐作用的影响是地震储层预测方法所不可避免但至今又难以有效解决的问题。因此,天然气预测技术的应用需要与其他储层预测结果相结合,以该地区含气储层地质特征的认识为指导,方能减小歧口凹陷超深天然气勘探风险。

5 结论

1) 时频分析方法是检测含气低频异常的基础。

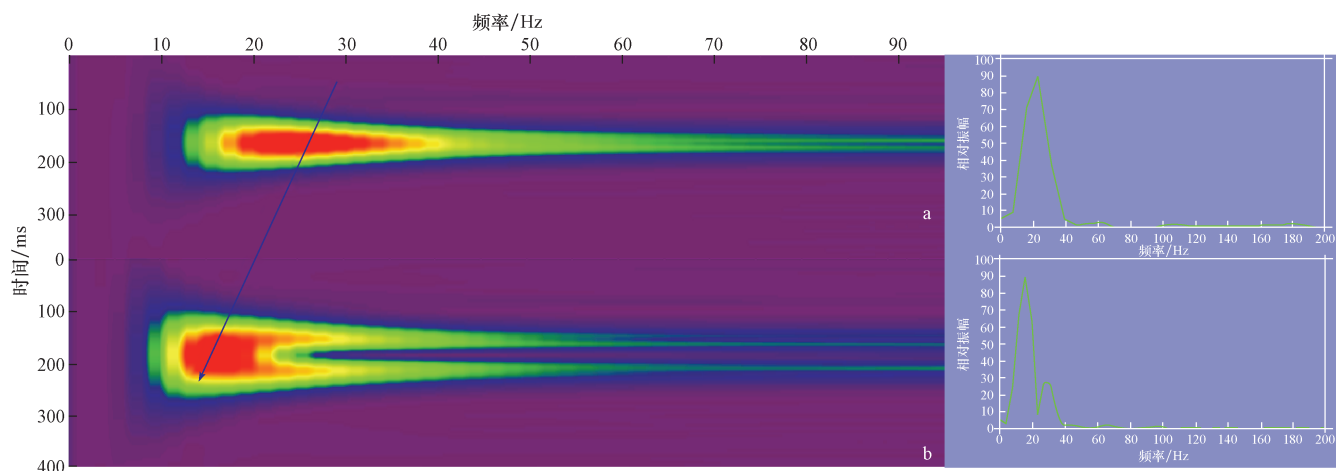


图12 正演记录频谱分解对比

Fig. 12 Amplitude spectrum decomposition comparison map of forward modeling records

通过选择大小约2倍于地震子波两波谷间的平均距离的Hanning时间窗函数,进行短时傅氏变换方法,可以获得较高的时频分辨率。同时,Hanning窗函数或Hamming窗函数适用于含气储层低频异常的检测,便于发现地震记录低频段的异常。

2) 瞬时子波吸收技术消除了反射系数的影响,能精确的将含气层段从背景中区分。

3) “甜点”属性(振幅频率比方法)能够有效预测厚含气储层的分布。

4) 造成高频段能量吸收的原因有众多的岩石物理机制,需与含气储层的地质认识、储层预测研究结果结合,逐步降低含气检测方法的预测风险。

参 考 文 献

- [1] 王振升,于学敏,国建英,等. 歧口凹陷天然气地球化学特征及成因分析[J]. 天然气地球科学,2010,21(4):683-690.
Wang Zhensheng, Yu Xuemin, Guo Jianying, et al. Geochemical characteristic and genesis of natural gas in Qikou sag[J]. Natural Gas Geoscience, 2010, 21(4): 683-690.
- [2] 于学敏,姜文亚,何炳振,等. 歧口凹陷古近系天然气藏主要特征[J]. 石油与天然气地质,2012,33(2):183-188.
Yu Xuemin, Jiang Wenya, He Bingzhen, et al. Characteristics of the Paleogene gas reservoir[J]. Oil & Gas Geology, 2012, 33(2): 183-188.
- [3] 王书香,何咏梅,刘庆新,等. 歧口凹陷深层天然气勘探潜力[J]. 油气地质与采收率,2009,16(6):49-52.
Wang Shuxiang, He Yongmei, Liu Qingxin, et al. Exploration potential of deep natural gas of Qikou Depression[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2009, 16(6): 49-52.
- [4] 边立恩,于茜,韩自军,等. 基于谱分解技术的储层定量地震解释[J]. 石油与天然气地质,2011,32(5):718-723.
Bian Lien, Yu Qian, Han Zijun, et al. Quantitative seismic interpretation of reservoirs based on spectral decomposition technique[J]. Oil & Gas Geology, 2011, 32(5): 718-723.
- [5] 张雷,卢双舫,张学娟,等. 地震频谱成像的地质含义及在沉积特征研究中的应用[J]. 石油与天然气地质,2009,30(6):

779-785.

Zhang Lei, Lu Shuangfang, Zhang Xuejuan, et al. Geologic implication of seismic spectrum imaging and its application to researcher on sedimentary features[J]. Oil & Gas Geology, 2009, 30(6): 779-785.

- [6] 徐天吉,程冰杰,唐建明,等. 川西坳陷须家河组小波域间吸收属性应用研究[J]. 石油与天然气地质,2009,30(2):245-249.
Xu Tianji, Cheng Bingjie, Tang Jianming, et al. A study on application of interbed absorption attribute in wavelet domain to the Xujiahe Formation in western Sichuan Depression[J]. Oil & Gas Geology, 2009, 30(2): 245-249.
- [7] Peyton L, Bottjer R, Partyka G. Interpretational of incised valleys using new 3D seismic techniques; a case history using spectral decomposition and coherency[J]. The Leading Edge, 1998, 17(10): 1294-1298.
- [8] Partyka G, Gridley J, Lopez J. Interpretational applications of spectral decomposition in reservoir characterization[J]. The Leading Edge, 1999, 18(3): 353-360.
- [9] Odebeatu E, Zhang J, Chapman M, et al. Application of spectral decomposition to detection of dispersion anomalies associated with gas saturation[J]. The Leading Edge, 2006, 25(2): 206-210.
- [10] Castagna J P, Sun S. Comparison of spectral decomposition methods[J]. First Break, 2006, 24(1): 75-79.
- [11] 王宏语,赵全国. 瞬时子波吸收分析技术在复杂地区的应用——以吐哈盆地鄯善地区为例[J]. 天然气地球科学,2007,18(2): 289-292.
Wang Hongyu, Li Quanguo. Application of absorption analysis technique for instantaneous wavelet complex area; a case in Shanle area in Tuha Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2007, 18(2): 289-292.
- [12] 何诚,李邗,张延充,等. 单频成像技术在油气检测中的应用[J]. 天然气工业,2008,28(4):40-42.
He Cheng, Li Han, Zhang Yanchong, et al. Application of monofrequency imaging in oil and sand gas recognition[J]. Natural Gas Industry, 2008, 28(4): 40-42.
- [13] 张益明,李续宣,符力耕,等. 瞬时子波吸收分析技术的应用——以中国近海天然气检测为例[J]. 石油物探,2009,48(4): 368-376.
Zhang Yiming, Li Xuxuan, Fu Ligen, et al. Application of instantaneous wavelet absorption on offshore gas detection in China[J]. Geo-

- physical Prospecting for Petroleum, 2009, 48(4): 368–376.
- [14] 黄饶, 陈小宏, 李景叶. 基于谱分解的气藏识别技术与应用[J]. 石油地球物理勘探, 2010, 45(1): 35–39.
- Huang Rao, Chen Xiaohong, Li Jingye, et al. Spectral decomposition based gas reservoir identification and its application[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2010, 45(1): 35–39.
- [15] 杨占龙, 沙雪梅, 李在光. 含油气检测技术及其在岩性圈闭油气藏勘探中的应用[J]. 天然气地球科学, 2010, 21(5): 822–827.
- Yang Zhanlong, Sha Xuemei, Li Zaiguang, et al. Hydrocarbon detection and application in lithologic reservoir exploration[J]. Natural Gas Geoscience, 2010, 21(5): 822–827.
- [16] 张会星, 何兵寿, 姜效典, 等. 利用地震波在双相介质中的衰减特性检测油气[J]. 石油地球物理勘探, 2010, 45(3): 343–349.
- Zhang Huixing, He Bingshou, Jiang Xiaodian, et al. Utilizing attenuation characteristic of seismic wave in dual-phase medium to detect oil and gas[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2010, 45(3): 343–349.
- [17] 宋效文, 马世忠, 秦秋寒, 等. 频谱分解技术在深层致密砾岩气藏检测中的应用[J]. 石油地球物理勘探, 2012, 47(3): 107–113.
- Song Xiaowen, Ma Shizhong, Qin Qiuhan, et al. Application of spectral decomposition in deep tight conglomerate reservoir prediction[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2012, 47(3): 107–113.
- [18] Castagna J P, Sun S, Siegfried R W. Instantaneous spectral analysis: detection of low-frequency shadows associated with hydrocarbons[J]. The Leading Edge, 2003, 22(1): 127–129.
- [19] Mitchell J T, Derzhi N, Lichman E, et al. Energy absorption analysis: a case study[Z]. Expanded Abstracts of 66th Annual International SEG Meeting, 1996: 1785–1788.
- [20] Lichman E, Goloshubin G. Unified approach to gas and fluid detection on instantaneous seismic wavelets[Z]. Expanded Abstracts of 73rd Annual International SEG Meeting, 2003: 1669–1702.
- [21] 高建虎, 雍学善, 刘洪, 等. 叠后地震油气检测技术与应用[J]. 石油物探, 2006, 45(4): 385–389.
- Gao Jianhu, Yong Xueshan, Liu Hong, et al. Post-stack seismic hydrocarbon detection technology and application[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2006, 45(4): 385–389.

(编辑 张亚雄)

(上接第 833 页)

- [7] 霍志鹏, 庞雄奇, 杜宜静, 等. 含油气盆地油气藏破坏的油气显示及其地质意义[J]. 石油与天然气地质, 2013, 34(4): 421–430.
- Huo Zhipeng, Pang Xiongqi, Du Yijing, et al. Oil-gas shows from destruction oil/gas reservoirs in the petroliferous basins of China and their geological significance[J]. Oil & Gas Geology, 2013, 34(4): 421–430.
- [8] 胡素云, 郭秋麟, 湛卓恒, 等. 油气空间分布预测方法[J]. 石油勘探与开发, 2007, 34(1): 113–117.
- Hu Suyun, Guo Qiulin, Chen Zhuoheng, et al. A method of predicting petroleum resource spatial distribution and its application[J]. Petroleum Exploration and Development, 2007, 34(1): 113–117.
- [9] White D A. Geologic risking guide for prospects and plays[J]. AAPG Bulletin, 1993, 77(12): 2048–2061.
- [10] Rose P R. Chance of success and its use in petroleum exploration[C]// Norman H F, Edward A B. The business of petroleum exploration. AAPG Treatise of Petroleum Geology, Handbook of Petroleum Geology, 1992: 71–86.
- [11] 陈善勇, 金之钧, 刘小平. 黄骅拗陷第三系油气成藏体系定量评价[J]. 石油与天然气地质, 2004, 25(5): 544–547, 602.
- Chen Shanyong, Jin Xhijun, Liu Xiaoping. Quantitative evaluation of Tertiary petroleum accumulation systems in Huanghua depression[J]. Oil & Gas Geology, 2004, 25(5): 544–547, 602.
- [12] 吕鸣岗, 朱向东. 圈闭/区带的地质风险分析[J]. 石油学报, 1997, 18(2): 49–53.
- Lv Minggang, Zhu Xiangdong. Geological risk analysis of trap and play[J]. Acta Petrolei Sinica, 1997, 18(2): 49–53.
- [13] Loeliger H A, Lustenberger F. Probability propagation and decoding in analog VLSI[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2001, 47(2): 837–843.
- [14] Casella G, Robert C P. Monte carlo statistical methods, second edition[M]. New York: Springer, 2004.
- [15] Lee P J. Statistical methods for estimating petroleum resources[M]. London: Oxford University Press, 2008.
- [16] Chen Zhuoheng. Undiscovered petroleum accumulation mapping using model-based stochastic simulation[J]. Mathematical Geology, 2006, 38(1): 1–16.
- [17] US Geological Survey World Energy Assessment Team. US Geological Survey World Petroleum Assessment 2000—Description and results. US Geological Survey Data Series DDS-60, 4 CD-ROM, 2000.
- [18] Zipf G K. Human behavior and the principle of least effort[M]. Cambridge, London: Addison-Wesley, 1949.
- [19] 蒋宗礼. 人工神经网络导论[M]. 北京: 高等教育出版社, 2001.
- Jiang Zongli. Introduction to artificial neural networks[M]. Beijing: China Higher Education Press, 2001.
- [20] 金之钧. 五种油气藏规模概率分布模型比较研究[J]. 石油学报, 1995, 74(3): 12–15.
- Jin Zhijun. A comparison study on five basic oil and gas pool size probability distribution models and its significance[J]. Acta Petrolei Sinica, 1995, 74(3): 12–15.
- [21] Kaufman G M. Statistical decision and related techniques in oil and gas exploration[M]. Englewood Cliffs, USA: Prentice-Hall, 1963.

(编辑 高岩)