

鲁银涛, 曹晓初, 冉伟民, 等. 希尔伯特-黄变换在浅海沉积体系地震精细识别刻画中的应用[J]. 海洋学报, 2021, 43(5): 100-109, doi:10.12284/hyxb2021061

Lu Yintao, Cao Xiaochu, Ran Weimin, et al. Application of Hilbert-Huang transform method in fine illustrating shallow marine sediment system[J]. Haiyang Xuebao, 2021, 43(5): 100-109, doi:10.12284/hyxb2021061

希尔伯特-黄变换在浅海沉积体系地震 精细识别刻画中的应用

鲁银涛¹, 曹晓初¹, 冉伟民^{2,3*}, 栾锡武^{2,3}, 许小勇¹, 李东¹,
杨涛涛¹, 邵大力¹, 魏新元^{3,4}

(1. 中国石油杭州地质研究院, 浙江 杭州 310023; 2. 中国地质调查局青岛海洋地质研究所, 山东 青岛 266071; 3. 青岛海洋科学与技术试点国家实验室 海洋矿产资源评价与探测技术功能实验室, 山东 青岛 266237; 4. 中国海洋大学 海洋地球科学学院, 山东 青岛 266100)

摘要: 位于马来盆地与西纳土纳盆地交汇处的研究区上新统-更新统发育复杂的浅海、海陆过渡相水下分支河道体系, 常规的地震资料无法进行精细识别刻画。通过对叠后地震资料进行希尔伯特-黄变换, 提取了地震资料高频分量, 提高了地震资料的分辨率, 有效识别了薄层砂泥岩交互特征和细微沉积体。通过对高频分量进行瞬时属性提取, 明确了目的层段水下分支河道的平面展布特征。与常规叠后地震属性相比, 经过希尔伯特-黄变换后的叠后地震资料提取的瞬时属性显示了更多沉积体系的细节特征, 为水下分支河道的内部结构、发育期次、切割关系等时空演化研究提供了更高分辨率的地震数据。

关键词: 希尔伯特-黄变换; 瞬时属性; 海陆过渡相沉积; 多期河道演化

中图分类号: P631.4

文献标志码: A

文章编号: 0253-4193(2021)05-0100-10

1 引言

浅海、海陆过渡相沉积体系一般发育复杂网状水下分支河道系统, 这类水下分支河道往往规模小、数量大、期次多、切割关系复杂, 常规的地震资料较难识别这类沉积体系的边界和空间展布特征。由于垂向、侧向迁移快, 沉积结构单元的空间展布特征复杂, 对有利储集体空间展布的刻画存在较大困难^[1-4]。现今对这类沉积体系的研究主要基于地震资料, 所以对沉积体系的空间展布特征的刻画很大程度地受限于地震资料的品质^[5-7]。

希尔伯特-黄变换(HHT)是一种处理复杂的非线性、非平稳地震信号的工具^[8-10]。针对复杂地震信号进行时频分析, HHT能够有效提高地震资料分辨率、地震瞬时属性、消除噪声, 对识别隐蔽型地质体、小型沉积体、小断裂等具有很好的效果^[11-12], 特别是对检测地质体边缘具有较高的实用性。HHT通过经验模态分解(EMD)方法将信号分解成有限个固有模态函数(IMF)分量之和, 根据有效波和噪声分布在不同的分辨尺度范围内进行数据重构, 提高地震资料品质; 或者对IMF分量进行希尔伯特变换求取其瞬时函数^[12], 得到高品质地震属性, 识别地质体。

收稿日期: 2020-03-12; 修订日期: 2020-04-15。

基金项目: 国家自然科学基金(42076219, 42006067, 92055211); 中国-东盟海洋地震数据平台与研究项目(12120100500017001); 中国石油集团科技重大专项(2019A-1009, 2019D-4309)。

作者简介: 鲁银涛(1983—), 男, 湖北省荆门市人, 博士, 高级工程师, 主要从事油气地质评价工作。E-mail: luyt_hz@petrochina.com.cn

* 通信作者: 冉伟民(1990—), 男, 博士, 主要从事海洋地质与油气地质研究工作。E-mail: ranweim@163.com

本文针对西纳土纳盆地浅海相沉积中的小型分支河道开展识别研究,旨在刻画水下分支河道的平面展布特征。在常规三维地震资料的基础上,通过HHT对三维叠后地震资料进行重新处理,提高了地震分辨率,有助于在地震剖面上识别河道的边界;通过对HHT变换后的三维地震提取瞬时地震属性,河道的平面展布特征在属性图上更加清晰。与常规地震属性对比,经过HHT的地震资料对沉积体系的精细刻画研究提供了更高分辨率的地震数据。

2 区域地质背景

研究区位于马来盆地与西纳土纳盆地交汇处(图1)。晚始新世至早渐新世,研究区由于受印澳联合板块与欧亚板块的相互挤压,形成SE向走滑运动,导致该区发生陆内断陷作用[13-18],发育一系列NW-SE向地堑-半地堑,发育裂陷期沉积,沉积以湖相沉积为主,是烃源岩发育主要层系,研究区就位于该地堑-半地堑体系的东缘[19-21];而后早渐新世-晚渐新世,构造作用很弱,发育后裂陷期沉积,以沉积河流相(砂岩为主)与湖相(泥页岩为主)交互沉积地层为主,是储层发育主要层系,期间发育的湖相泥岩是比较好的层间盖层[22-25];晚渐新世-中中新世,南海扩张停止导致该区域由前期拉张应力场改变为挤压和压扭应力场环

境[26-27]。NW-SE向的挤压应力场重新激活了裂谷期的控盆断裂并使其发生反转,形成一系列NE-SW方向的反转构造[28-30],使沉积地层向上抬升,发育大型不整合界面,发育反转期沉积,主要由一系列海进海退旋回沉积组成,沉积环境从湖相到滨浅海相再到含煤层较多的海陆过渡相变化;中中新世后,构造相对稳定,发育后反转期沉积,主要发育滨浅海相-海陆过渡相沉积[25-28](图1)。

本文研究目标主要集中在上新世-更新世的后反转期沉积层,该时期构造活动稳定,发育滨浅海相沉积,水下分支河道发育,多期叠置特征复杂,是刻画河道沉积结构单元的有利层段。

3 数据和方法

3.1 地震资料特征

本次研究使用的三维地震数据为叠后时间域地震数据,主频约30 Hz,主频较低,频带较窄(图2)。研究目的层上新统-全新统地层对应地震剖面上0.5 s以上层段,构造相对稳定,发育上新统-更新统海陆过渡相沉积,以水下分支河道为主(图3)。该层段地震剖面主要呈平行-亚平行强弱相间的反射特征,夹弱反射地震反射体(图4)。

这些弱反射地震反射体为下分支河道,在地震剖

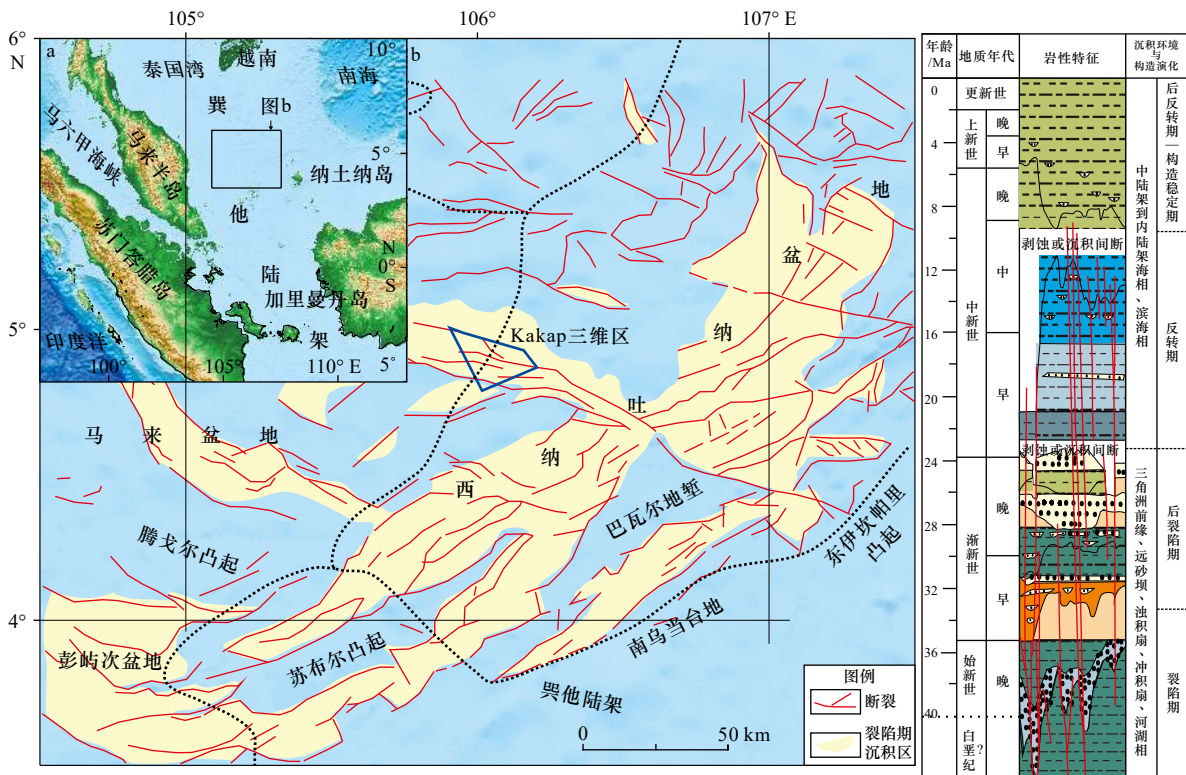


图1 研究区构造位置及综合地层柱状图[13-20]

Fig. 1 The location and comprehensive stratigraphic histogram of the study area [13-20]

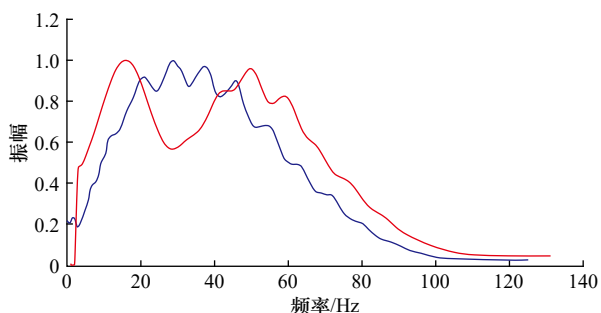


图2 原始地震资料频谱(蓝线)与HHT变换后第一分量地震频谱(红线)对比(振幅归一化处理)

Fig. 2 Comparison between the spectrum of original seismic data (blue line) and the spectrum of the first component after HHT transformation (red line) (amplitude normalization)

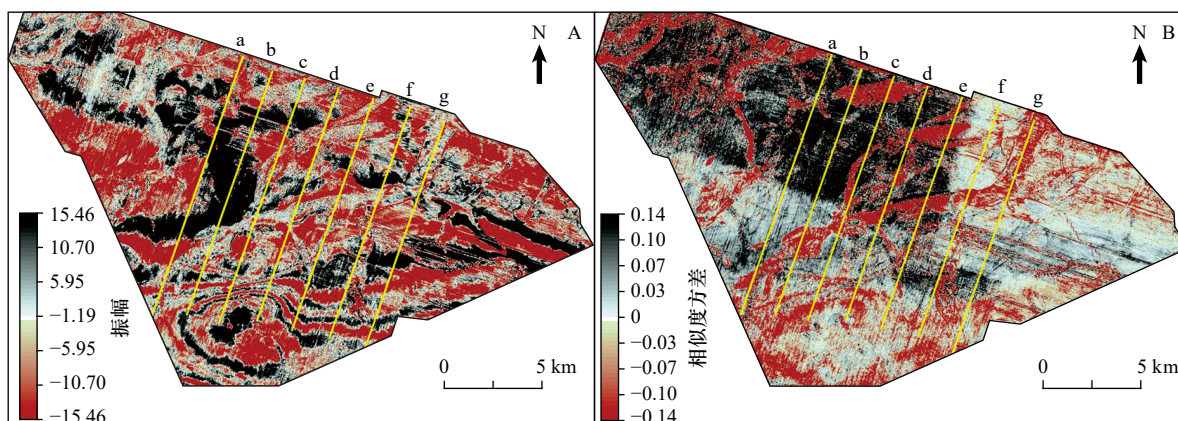


图3 研究区三维原始叠后地震资料0.3 s等时切片(A为振幅切片,B为相干切片)

Fig. 3 0.3 s isochronous slice of 3D original post stack seismic data in the study area (A is amplitude slice and B is coherent slice)

3.2 希尔伯特-黄变换

希尔伯特-黄变换时频分析方法是黄变换与希尔伯特变换的结合算法,黄变换可将原始信号自适应地分解成一系列本征模态函数分量(图5),对这些本征模态函数分量进行希尔伯特变换就可以获得有意义的瞬时频率,从而给出频率随时间变化的精确表达^[3-12,31-33]。由于相比较小波变换提取的分量,黄变换分解的本征模态函数分量在频率成分方面更加纯净,是一种较优越的信号分解算法,黄变换被广泛运用在信号处理中^[3-12,31-33]。结合希尔伯特变换后,HHT具有很好的时频分辨能力,在地震属性剖面提取方面的应用有助于对原始剖面中的细微构造特征或岩性界面进行较好的分辨和验证,在含噪地震数据的噪声剔除方面能够进一步得到信噪比品质较好的地震剖面,有利于对地下地层的正确识别^[9-7,11-12]。所以,HHT变换现在被广泛地运用在叠后地震资料处理上。

4 HHT 效果

经HHT后,信号频率有了明显增高,主频提高至

面上表现为地震反射特征杂乱、不连续,且振幅变弱。水下分支河道底界在地震剖面上有明显的河道下切侵蚀特征(图4),呈“U”型、“V”型或“W”型的强振幅反射;而水道顶面为水平状强振幅反射特征;水道内部为弱振幅-空白反射,频率较低,这种反射特征可能与充填物有关,岩性较均一的沉积物导致波阻抗差异较小,不易形成波阻抗界面,所以整体呈较均一反射,呈弱振幅甚至空白反射。基于原始叠后地震资料,尽管识别出河道大致形态,但受限于地震资料分辨率影响,河道与围岩的边界仍刻画不清,且多期河道发育交错切割关系及其内部精细充填特征仍不明确,需要进一步提高地震资料分辨率进行精细特征研究。

50 Hz左右,且频带宽度明显增加(图2)。经HHT的IMF1分量具有高频优势,分辨率明显增高,有助于表征薄层信息,特别能够反映岩性变化的细节特征。在砂泥岩互层的浅海、海陆过渡相沉积体系下,HHT后的地震数据能够检测薄层砂泥岩岩性变化的特征,能有效检测沉积体的边缘,区分水下分支河道和围岩的边界和砂泥岩沉积界面,为识别多期河道、刻画河道横向迁移、垂向叠置等特征提供了地震资料基础。

由HHT第一分量即高频分量(IMF1)结果可见(图6),虽然由于原始叠后地震资料弱振幅和空白反射范围较大,导致了经HHT后的第一分量也存在局部的空白反射和弱振幅反射带,但是整体来看,经HHT后的IMF1分量整体频率有了明显的提高,直观上表现为地震反射同相轴的数量有了明显的增加。比较原始叠后地震资料可见,在原始叠后地震资料上表现为空白反射的区域,有了强弱交替的地震反射波组出现,反映了砂泥岩岩性变化的特征。特别是在水道内

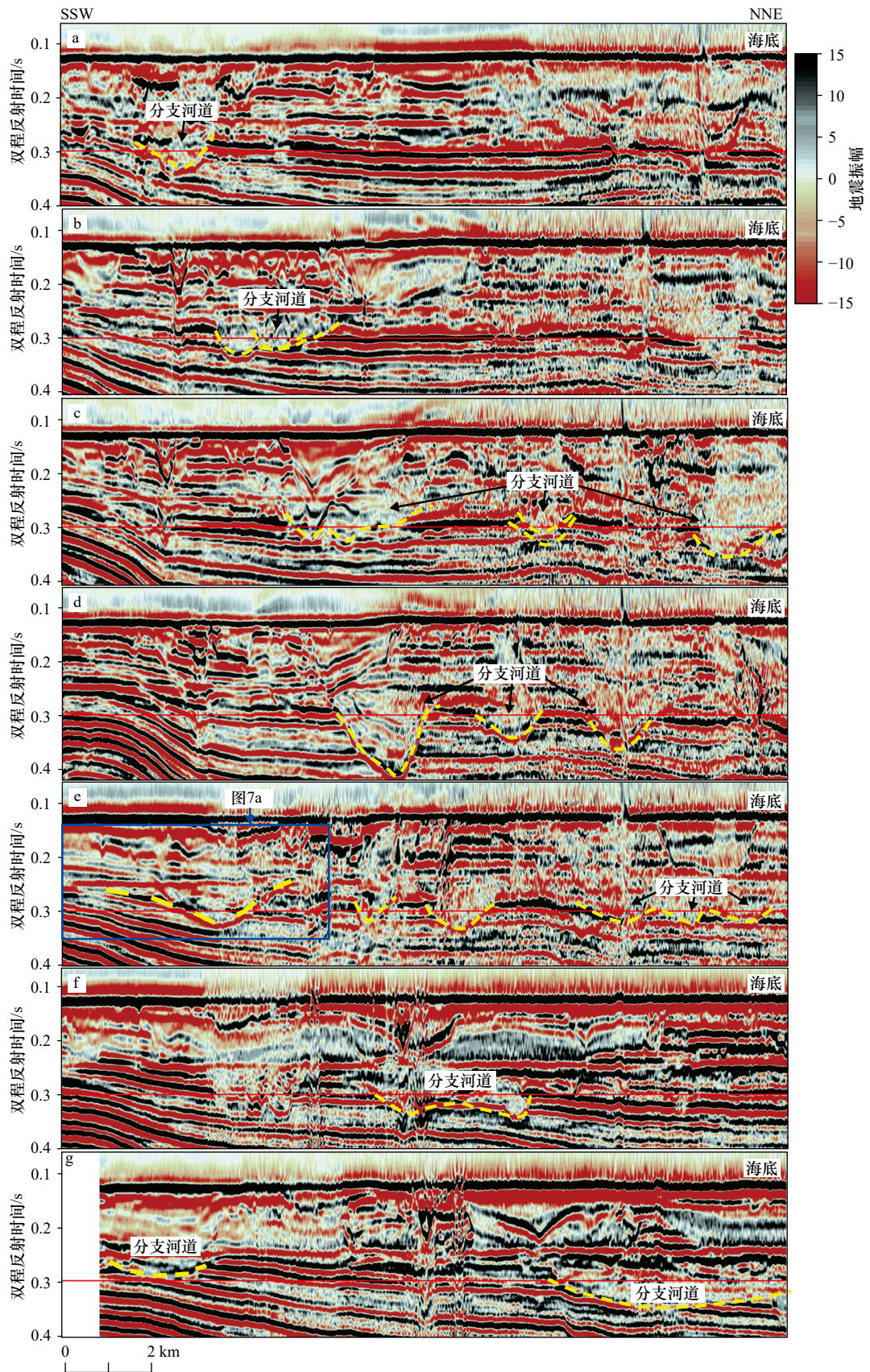


图4 研究区浅层水下分支河道典型地震剖面(剖面位置见图3)

Fig. 4 Typical seismic profile of shallow underwater branch channel in the study area (see Fig. 3 for profile location)

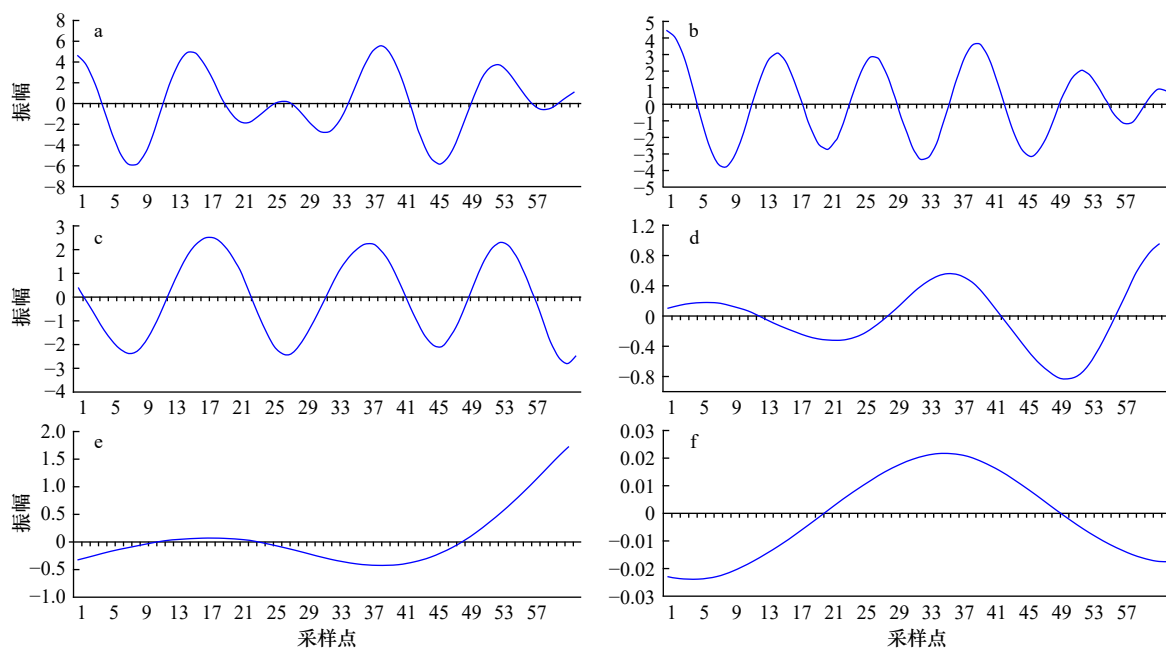


图5 理论信号黄分解本征模态分量图

Fig. 5 Eigenmode component diagram of theoretical signal Huang transform

a. 理论原始信号; b. 黄分解第一本征模态分量; c. 黄分解第二本征模态分量;

d. 黄分解第三本征模态分量; e. 黄分解第四本征模态分量; f. 残余分量

a. Theoretical original signal; b. the first eigenmode component of Huang transform; c. the second eigenmode component of Huang transform;

d. the third eigenmode component of Huang transform; e. the fourth eigenmode component of Huang transform; f. residual component

部,由原始地震剖面上呈弱振幅-空白反射区增强为内部“V”型和“U”型充填反射特征,反映了河道内部多期充填变化过程。

通过对比原始叠后地震剖面 and HHT 变换后的地震剖面, HHT 变换后的地震剖面无论是在地震反射连续性和频率上都有了明显的提高。对比过水分支河道的地震剖面(图6,图7), HHT 后的地震剖面上,河道顶底面的强反射仍然清晰,同时,能够追溯河道在横向上的延伸范围,可较清楚地识别河道内部层状充填与河道边缘楔状反射特征,确定河道砂体尖灭位置。

除了河道内部反射有了较大提高外,围岩的反射特征也有了较大程度地提高,原始地震剖面上不连续的反射体能够连续追踪,同时,原本振幅较弱或者空白反射区域,代表岩性变化不大或者岩性较均一的层段,出现了高频的地震反射体,说明这些层段和区域的岩性有细微的变化,符合浅海相、海陆过渡相沉积的特征。

5 水下分支河道地震剖面特征

利用 HHT 后的地震剖面仔细追踪上述地震剖面所横切的河道,有明显的底面侵蚀特征,通过主河道内部波组特征与相互间的切割交错关系,能够识别

5个不同期次河道发育特征反射体(图8)。

一般来讲,水下分流河道与辫状河道特征相似,具有垂向加积、侧向迁移、透镜体叠置等典型地震反射特征^[2,17]。在横切分流河道的地震剖面上,除有典型的侵蚀下切特征外,一般表现为双向上超调整,或明显的“底凹顶平”特征,期内部多为强振幅反射,为双向上超充填地震相模式,顶部被上覆泥岩地层所覆盖。在河道拐角部位,由于侧向侵蚀,凹岸一侧产生侧向侵蚀,把泥砂带到凸岸,由凸岸向凹岸倾斜向上发生堆积,砂岩超覆于泥岩之上,形成泥夹砂沉积,后期被上覆的泥岩所覆盖,形成岩性圈闭,在地震剖面上表现为典型单项上超充填地震相。正是由于侧向侵蚀的存在,使得水下分流河道侧向迁移,并且频繁改道。由于频繁迁移,在水下分流河道分支交汇处,往往在若干个以泥岩为主的围岩背景中发育多个透镜体且相互叠置。透镜体在地震剖面上表现为弱振幅-空白反射背景下的一段孤立的、能量向两侧迅速减弱的强振幅弧状地震相。强振幅反射体代表河道砂体,弱振幅-空白反射体代表河道间的富泥质沉积^[2]。

从地震剖面上可识别,一期河道规模较大,河道宽度较大,下切深度也较深,呈“V”字形态,说明改期是河道发育鼎盛期,建造了整个多期河道体系的格

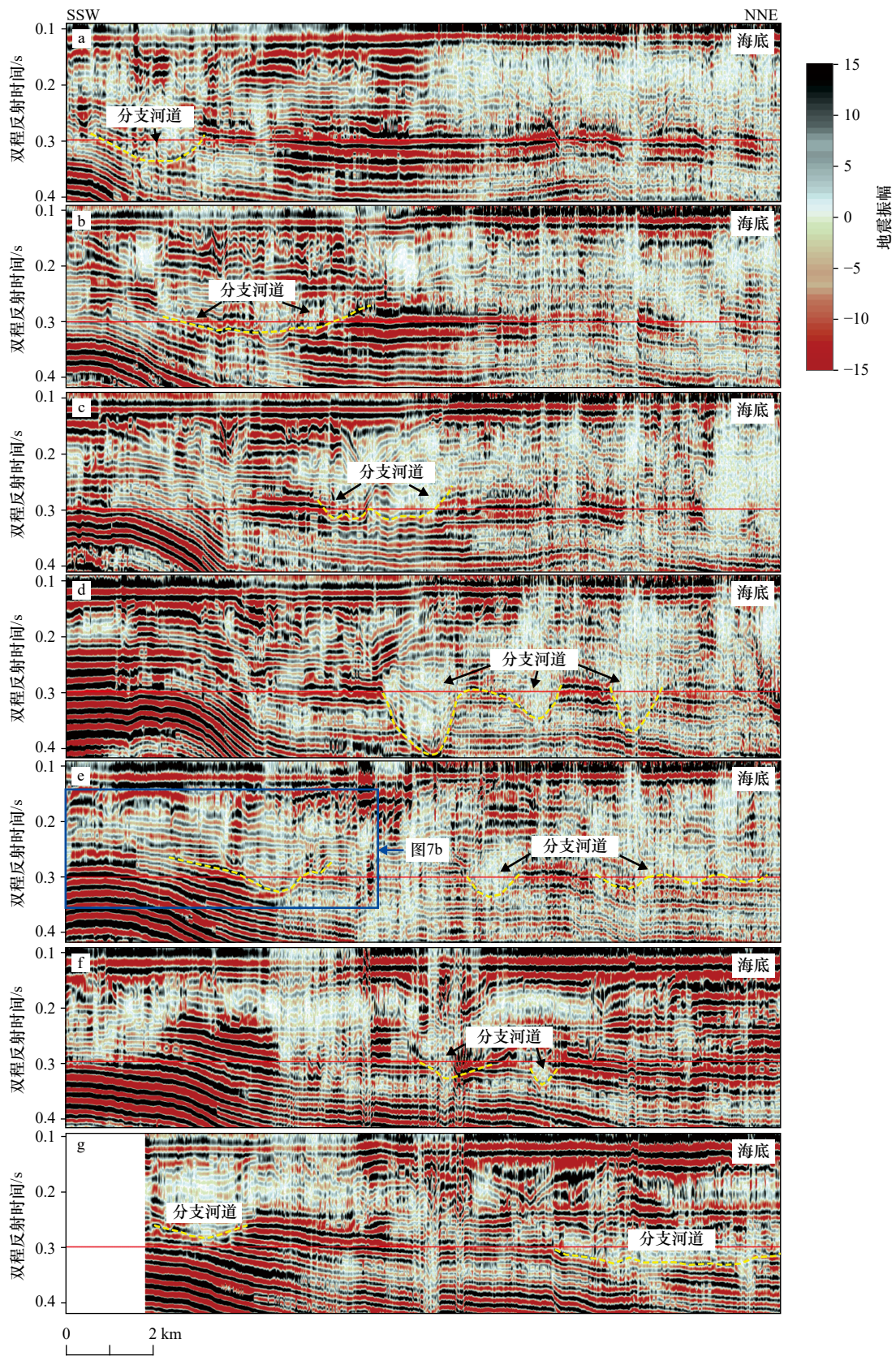


图6 过水下分支河道地震剖面HHT第一分量结果

Fig. 6 HHT first component results of underwater branch channel seismic profile

架。之后,二期河道在该处继承性发育,对一期河道充填沉积具有侵蚀作用,发育较清晰的侵蚀底界。二

期河道在宽度和深度上均较一期河道小很多,呈“U”型叠置在一期河道内。三期河道发生了明显的侧向

迁移, 向南改道, 并且对一期河道和二期河道均有明显的侵蚀, 呈“V”型发育在一期河道充填内。三期河道由于向南迁移, 侵蚀了二期河道的南部边界, 但是规模发生了较大程度的萎缩。四期河道向北迁移, 呈“U”型, 发育位置与二期河道相当, 宽度也与二期河

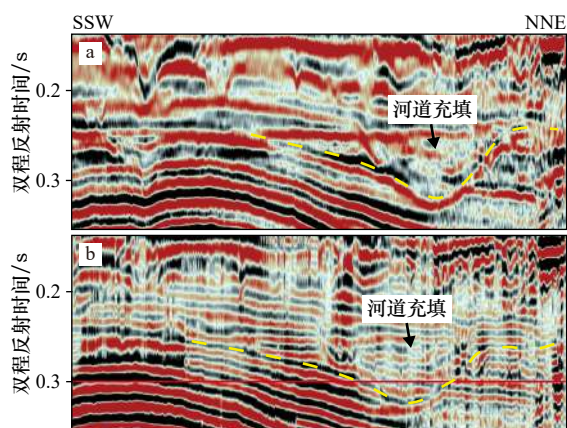


图7 HHT变换后地震剖面(b)与原始叠后地震剖面(a)河道内部充填细节对比(位置见图4和图6)

Fig. 7 Comparison of filling details between HHT transformed seismic profile (b) and original post stack seismic profile (a) (see Fig. 4 and Fig. 6 for location)

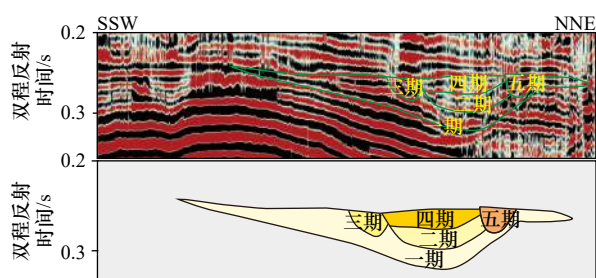


图8 河道地震剖面解释成果图与水道发育剖面模式
Fig. 8 Interpretation results of channel seismic profile and the development model of channel

道相近, 但深度较二期河道浅, 对二期河道也有侵蚀作用, 二者之间存在清晰界面; 该期河道对三期河道北侧有侵蚀作用, 导致三期河道北侧边缘缺失。五期河道继续向北迁移, 是该多期河道体系的最末期, 也是最北端的河道单元。改期河道宽度较小, 呈“U”字型, 对四期、二期、一期河道均有侵蚀作用, 导致了二期、四期河道的北部边缘缺失。

6 水下分支河道剖面展布特征

地震剖面上, 水下分支河道初始发育在双程走时(TWT)0.3 s层段, 通过等时切片可以展示上新统-全新统水下分支河道平面展布特征。0.3 s TWT地震振幅和相干属性等时切片上可观察到, 该时期水下分支河道呈复杂网状: 研究区中部发育一条相对大型的主水道, 呈NE-SW向展布, 其他水道宽度较小, 主要呈NE-SW、近E-W、NW-SE向展布。基于HHT后的地震数据体提取的地震属性刻画了水下分支河道沉积体系的细节特征, 如水道的延续、水道的切割关系等(图9); 另外, 一些在原始地震数据上忽略的小型河道, 在HHT后的地震数据提取的地震属性上被展现了出来。而且相干属性较振幅属性更加清晰地刻画了水下分支河道平面展布特征。

通过HHT后的地震等时切片和相干切片可观察到(图9), 上新统-全新统水下分支河道体系呈“多向、多支、多态”分布特征。“多向”是指河道具有多个延伸方向, 如研究区中部河道以NE-SW向为主; 研究区北部以NW-SE向为主; 研究区南部观察到一条近N-S向河道。“多支”是指研究区内发育多条河道外, 每条河道还具有多个分支, 构成了研究区内的河道网格体系; “多态”是指河道的形态多样, 既有比较平直

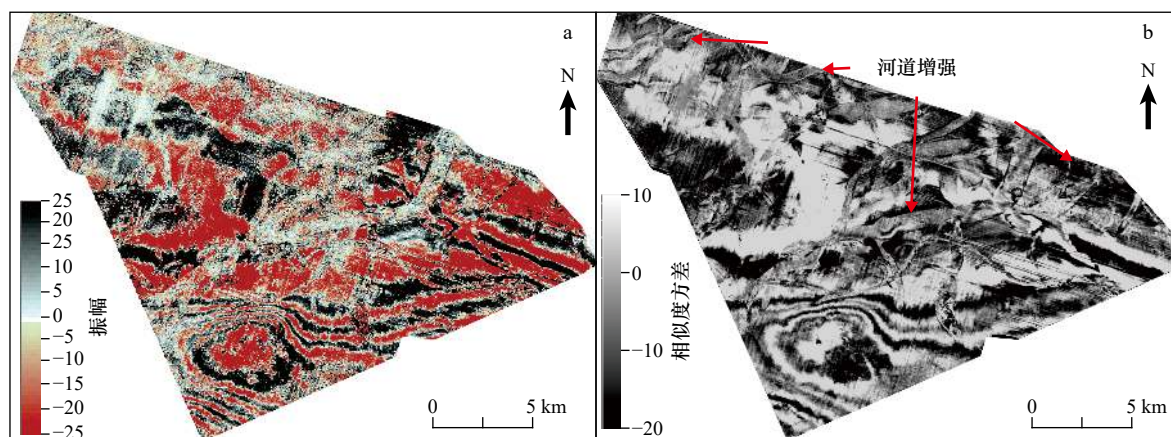


图9 研究区三维地震HHT变换第一分量0.3 s等时切片(a为振幅切片, b为相干切片)

Fig. 9 Isochronous slice of the first component 0.3 s of HHT transformation of 3D seismic data in the study area (a is amplitude slice and b is coherent slice)

的河道,也发育曲率比较大的弯曲河道。这种大量水道发育特征说明该时期河道沉积体系非常发育,且可能具有多个源头,反映该时期研究区可能发育于浅水、近源的沉积环境。

7 结论

通过对研究区地震资料进行HHT,提高了地震分辨率,有助于识别海陆过渡相水下分支河道的边界。HHT后的地震剖面展示了沉积体内部反射特征;通过提取HHT后的三维地震瞬时地震属性,河道的平面展布特征更加清晰。与常规地震属性对比,经过HHT的地震资料对沉积体系的精细刻画研究提供了更高分辨率的地震数据。

(1)HHT第一分量整体频率有了明显的提高,提高了地震分辨率,解释了沉积体系的内部细节特征和边界特征,与原始地震资料相比,更能展示小型水下

分支河道的平面展布特征和河道之间的相互切割关系。

(2)HHT后的地震剖面上,研究区内的典型水下分支河道可识别出5期发育过程,各期河道底界面具有明显侵蚀特征,晚期河道侵蚀早期河道,具有多期叠置、侧向迁移的特征。

(3)研究区上新统-全新统目的层发育大量水下分支河道,呈复杂网状结构,具有“多向、多支、多态”的沉积体系特征。与海陆过渡相沉积环境相符,反映了沉积时期研究区可能发育于浅水、近源的沉积环境。

致谢: 本文中所使用原始叠后地震数据来自于中油国际(新加坡)公司,在地震资料处理过程中,受到了中国石油杭州地质研究院各级领导的悉心帮助,在此一并感谢!

参考文献:

- [1] 黄光南. 希尔伯特-黄变换及其在地震资料分析处理中的应用[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2009.
Huang Guangnan. Hilbert-Huang transform and application of it in seismic data analysis and processing[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2009.
- [2] 李辉峰, 杨蕾. 泌阳凹陷孙岗地区水下分流河道地震识别及预测[J]. 新疆石油地质, 2012, 33(6): 654-656.
Li Huifeng, Yang Lei. Seismic recognition and prediction of underwater distributary channels in Sungang area of Biyang sag[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2012, 33(6): 654-656.
- [3] 颜中辉, 方刚, 徐华宁, 等. 希尔伯特谱白化方法在海洋地震资料高分辨率处理中的应用[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2008, 38(4): 212-220.
Yan Zhonghui, Fang Gang, Xu Huaning, et al. The application of Hilbert spectral whitening method to high resolution processing of marine seismic data[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2008, 38(4): 212-220.
- [4] 杨凯, 刘伟. 基于希尔伯特-黄变换的地震资料高分辨率处理[J]. 工程地球物理学报, 2015, 12(1): 22-26.
Yang Kai, Liu Wei. The marine seismic data high resolution processing based on Hilbert-Huang transform[J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2015, 12(1): 22-26.
- [5] 颜中辉, 王赞, 李攀峰, 等. 基于希尔伯特-黄变换的多分量地震去噪方法研究及应用[J]. 地球物理学进展, 2015, 30(6): 2846-2854.
Yan Zhonghui, Wang Yun, Li Panfeng, et al. Research and application of multi-component seismic denoising based on Hilbert-Huang transform[J]. Progress in Geophysics, 2015, 30(6): 2846-2854.
- [6] 李延, 顾汉明. 基于改进的希尔伯特-黄变换的岩性油藏识别方法[J]. 石油地球物理勘探, 2015, 50(2): 341-345.
Li Yan, Gu Hanming. Lithologic reservoir identification based on the improved Hilbert-Huang transform[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2015, 50(2): 341-345.
- [7] 曹思远, 邴萍萍, 路交通, 等. 利用改进希尔伯特-黄变换进行地震资料时频分析[J]. 石油地球物理勘探, 2013, 48(2): 246-254.
Cao Siyuan, Bing Pingping, Lu Jiaotong, et al. Seismic data time-frequency analysis by the improved Hilbert-Huang transform[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2013, 48(2): 246-254.
- [8] Huang N E. Computer implemented empirical mode decomposition method, apparatus, and article of manufacture for two-dimensional signals[P]. US: US6311130B1, 2011-10-30.
- [9] Huang N E, Shen Zheng, Long S R, et al. The empirical mode decomposition and the hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis[J]. Proceeding of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 1998, 454(1971): 903-995.
- [10] Huang N E, Wu M L C, Long S R, et al. A confidence limit for the empirical mode decomposition and Hilbert spectral analysis[J]. Proceeding of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 2003, 459(2037): 2317-2345.
- [11] 梁岳, 顾汉明, 姚知铭. 改进的希尔伯特-黄变换在储层预测中的应用[J]. 石油物探, 2016, 55(4): 606-615.
Liang Yue, Gu Hanming, Yao Zhiming. The application of improved Hilbert-Huang transform in reservoir prediction[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2016, 55(4): 606-615.
- [12] 冯红武, 王建昌. 希尔伯特-黄变换在地震信号时频分析中的应用研究[J]. 高原地震, 2018, 30(4): 11-15.

- Feng Hongwu, Wang Jianchang. Applied research on Hilbert–Huang transform in time-frequency analysis of seismic signal[J]. *Plateau Earthquake Research*, 2018, 30(4): 11–15.
- [13] 倪仕琪, 王志欣, 宋继叶, 等. 南海西南部西纳土纳盆地油气成藏组合分析与资源潜力评价[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2018, 38(5): 130–143.
- Ni Shiqi, Wang Zhixin, Song Jiye, et al. Analysis and resource evaluation of hydrocarbon plays in the West Natuna Basin, southwestern part of the South China Sea[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2018, 38(5): 130–143.
- [14] 倪仕琪, 王志欣, 刘凤鸣, 等. 印度尼西亚西纳土纳盆地油气地质特征与分布规律[J]. *海洋地质前沿*, 2017, 33(2): 26–34.
- Ni Shiqi, Wang Zhixin, Liu Fengming, et al. Geological characteristics and distribution pattern of petroleum in West Natuna Basin, Indonesia[J]. *Marine Geology Frontiers*, 2017, 33(2): 26–34.
- [15] 毕素萍, 张寿庭, 夏朝辉, 等. 西纳土纳盆地K区块反转构造与油气成藏[J]. *中国海上油气*, 2016, 28(4): 24–29.
- Bi Suping, Zhang Shouting, Xia Zhaohui, et al. Inversion structures and their controls on hydrocarbon accumulation in Block K, West Natuna Basin[J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2016, 28(4): 24–29.
- [16] 毕素萍, 潘懋, 夏朝辉, 等. 南海西南部西纳土纳盆地中部走滑构造带分段性及对油气控制作用[J]. *地质论评*, 2016, 62(3): 770–778.
- Bi Suping, Pan Mao, Xia Zhaohui, et al. Strike slip structures segmentation and its control of hydrocarbon accumulation in middle part of the West Natuna Basin[J]. *Geological Review*, 2016, 62(3): 770–778.
- [17] 毕素萍, 张寿庭, 张铭, 等. 印尼西纳土纳盆地Muda组河流体系分析[J]. *科学技术与工程*, 2016, 16(7): 134–138.
- Bi Suping, Zhang Shouting, Zhang Ming, et al. Fluvial system analysis of Muda formation in West Natuna Basin, Indonesia[J]. *Science Technology and Engineering*, 2016, 16(7): 134–138.
- [18] 刘海. 东、西纳土纳盆地石油地质特征及对比研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2012.
- Liu Hai. Contrast and research of petroleum geological characteristics: West and East Natuna Basin[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2012.
- [19] Meirita M F. Structural and depositional evolution, KH field, West Natuna Basin, offshore Indonesia[D]. Texas: Texas A&M University, 2004.
- [20] McClay K, Bonora M, Comrie-Smith N, et al. Geometries and kinematics of inversion tectonics, West Natuna Sea Basin, Indonesia[J]. *AAPG Bulletin*, 2000, 84(9): 1463.
- [21] Shoup R C, Morley R J, Swiecicki T, et al. Tectono-stratigraphic framework and tertiary paleogeography of Southeast Asia; gulf of Thailand to south Vietnam shelf[J]. *Houston Geological Society Bulletin*, 2013, 55(6): 27, 29, 31, 33, 35, 37, 39.
- [22] Du Bois E P. Review of principal hydrocarbon-bearing basins of the South China Sea area[J]. *Energy*, 1981, 6(11): 1113–1140.
- [23] Burton D, Wood L J. Seismic geomorphology and tectonostratigraphic fill of half grabens, West Natuna Basin, Indonesia[J]. *AAPG Bulletin*, 2010, 94(11): 1695–1712.
- [24] Ngah K, Madon M, Tjia H D. Role of pre-Tertiary fractures in formation and development of the Malay and Penyu basins[J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 1996, 106(1): 281–289.
- [25] Ginger D C, Ardjakusumah W O, Hedley R J, et al. Inversion history of the West Natuna Basin: examples from the Cumi-Cumi PSC[C]//Proceedings of the 22nd Annual Convention Proceedings. Jakarta: Indonesian Petroleum Association, 1993: 635–658.
- [26] Doust H, Sumner H S. Petroleum systems in rift basins—a collective approach in Southeast Asian basins[J]. *Petroleum Geoscience*, 2007, 13(2): 127–144.
- [27] Hakim M R, Naiola M Y Y, Simangunsong Y R A, et al. Hydrocarbon play of West Natuna Basin and challenge for new exploration related to structural setting and stratigraphic succession[C]//Proceedings of 32nd Annual Convention Proceedings. Jakarta: Indonesian Petroleum Association, 2008, IPA08-SG-039.
- [28] Manur H, Jacques J M. Deformational characteristics of the West Natuna Basin with regards to its remaining exploration potential[C]//Proceedings of 38th Annual Convention Proceedings. Jakarta: Indonesian Petroleum Association, 2014, IPA14-G-193.
- [29] Tjia H D, Liew K K. Changes in tectonic stress field in northern Sunda Shelf basins[J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 1996, 106(1): 291–306.
- [30] Tapponnier P, Lacassin R, Leloup P H, et al. The Ailao Shan/Red River metamorphic belt: Tertiary left-lateral shear between Indochina and South China[J]. *Nature*, 1990, 343(6257): 431–437.
- [31] 肖剑, 柳斌, 郭亚龙, 等. 基于希尔伯特变换的干涉仪信号处理[J]. *探测与控制学报*, 2010, 32(1): 80–83.
- Xiao Jian, Liu Bin, Guo Yalong, et al. Signal processing of microwave interferometer based on Hilbert transform[J]. *Journal of Detection & Control*, 2010, 32(1): 80–83.
- [32] 杨培杰, 印兴耀, 张广智. 希尔伯特–黄变换地震信号时频分析与属性提取[J]. *地球物理学进展*, 2007, 22(5): 1585–1590.
- Yang Peijie, Yin Xingyao, Zhang Guangzhi. Seismic signal time-frequency analysis and attributes extraction based on HHT[J]. *Progress in Geophysics*, 2007, 22(5): 1585–1590.
- [33] 侯斌, 桂志先, 胡敏, 等. 基于希尔伯特–黄变换的地震信号时频谱分析[J]. *勘探地球物理进展*, 2009, 32(4): 248–251, 290.
- Hou Bin, Gui Zhixian, Hu Min, et al. Time-frequency spectral analysis of seismic data based on Hilbert–Huang transform[J]. *Progress in Exploration Geophysics*, 2009, 32(4): 248–251, 290.

Application of Hilbert-Huang transform method in fine illustrating shallow marine sediment system

Lu Yintao¹, Cao Xiaochu¹, Ran Weimin^{2,3}, Luan Xiwu^{2,3}, Xu Xiaoyong¹, Li Dong¹,
Yang Taotao¹, Shao Dali¹, Wei Xinyuan^{3,4}

(1. *China Petroleum Hangzhou Institute of Geology, Hangzhou 310023, China*; 2. *Qingdao Institute of Marine Geology, China Geological Survey, Qingdao 266071, China*; 3. *Laboratory for Marine Mineral Resources, Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology(Qingdao), Qingdao 266237, China*; 4. *College of Marine Geosciences, Ocean University of China, Qingdao 266100, China*)

Abstract: The complex subaqueous channel system of shallow and transition facies is developed in the Pliocene-Pleistocene strata at the conjunction area of Malay Basin and West Natuna Basin, and can not be characterized in detail by conventional seismic data. By applying Hilbert-Huang transform to post-stack seismic data, the high frequency components of seismic data were extracted, the resolution of seismic data was improved, and the interaction characteristics of thin layer sand and mudstone and small sedimentary bodies were identified effectively. Through the instantaneous attribute extraction of the high frequency component, the plane distribution characteristics of the underwater branch channels in the target interval are defined. Compared with conventional post-stack seismic attributes, the instantaneous attributes extracted from post-stack seismic data after Hilbert-Huang transform show more detailed features of sedimentary system. And it provides high-resolution seismic data for the study of spatio-temporal evolution of underwater branch channels, such as internal structure, development period and cutting relationship.

Key words: Hilbert-Huang transform; instantaneous attributes; marine-continental transitional sediment; multi-period river channel evolution