

doi: 10.11720/wtyht.2022.1479

岳航羽,张明栋,张保卫,等.高分辨率单道地震探测技术在内陆浅水区的试验研究[J].物探与化探,2022,46(4):914-924.http://doi.org/10.11720/wtyht.2022.1479

Yue H Y, Zhang M D, Zhang B W, et al. An experimental study on the high-resolution single-channel seismic exploration technology for inland shallow waters[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2022, 46(4): 914-924. http://doi.org/10.11720/wtyht.2022.1479

高分辨率单道地震探测技术在内陆浅水区的试验研究

岳航羽^{1,2,3,4}, 张明栋⁵, 张保卫^{1,2,3}, 王广科^{2,3}, 王小江^{2,3}, 刘东明^{2,3}

(1. 中国地质调查局 地球物理调查中心, 河北 廊坊 065000; 2. 中国地质科学院 地球物理地球化学勘查研究所, 河北 廊坊 065000; 3. 国家现代地质勘查工程技术研究中心, 河北 廊坊 065000; 4. 中国地质大学(北京) 地球物理与信息技术学院, 北京 100083; 5. 江苏省地质勘查技术院, 江苏 南京 210049)

摘要: 单道地震探测技术以其配置灵活、简便高效、分辨率高的优势, 在海洋区域地质调查、近海工程物探等领域得到了广泛的应用, 但在内陆江河湖区域的实际应用案例较少。本文以河北雄安新区白洋淀为例, 开展内陆浅水区高分辨率单道地震探测技术试验研究; 对关键的采集参数, 包括激发能量、激发间隔、航行速度以及接收单元个数等进行实际效果对比, 以确定最优的参数组合; 制定一套内陆浅水区单道地震数据处理流程及方法技术组合, 逐步衰减各类干扰噪声, 最大程度地提高内陆浅水区单道地震剖面的信噪比及分辨率。试验结果表明, 内陆浅水域单道地震探测技术能够精细划分水域浅层地质结构, 并与钻探资料吻合较好, 有效地支撑服务江河湖环境、地质、地质灾害的调查研究。

关键词: 内陆浅水区; 高分辨率; 单道地震; 水域浅层地质结构

中图分类号: P631.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-8918(2022)04-0914-11

0 引言

随着科技的发展进步, 海洋地质、地球物理调查技术方法已进入快速发展阶段, 杨慧良等^[1]详细总结了我国海洋地质调查和海洋地球物理调查技术的发展状况、适用范围、主要存在的问题和发展方向。作为目前全世界海洋地球物理调查常用方法之一的单道地震探测技术, 具有高分辨率、高效率、低成本的优势^[2-6]。众多专家学者利用海上单道地震, 并结合重磁、多道地震、多波束、侧扫声呐、钻孔岩心等资料, 有效识别海底第四纪沉积层序^[7-10]、构造运动特征^[11-12]、活动断裂展布^[13-15]、浅层气位置^[16-17]、

海底沙脊沙波地貌^[18-19]等, 为海洋区域地质调查^[20]、近海工程建设^[21]、海洋地质环境演化^[22]、地质灾害识别^[23-24]、天然气水合物调查^[25-26]、矿产资源潜力预测^[27]及风电场选址测量^[28]等方面提供基础地质资料。

针对单道地震单一的覆盖次数及非等间距采集模式导致的剖面信噪比低、多次波发育、垂向振幅能量差异大等特点, 刘玉萍等^[29]从单道地震的采集原理出发, 阐述了单道地震资料处理中的 3 个难点及对应解决措施。李丽青等^[30-31]提出利用涌浪静校正技术解决单道地震资料中存在的同相轴跳动问题, 并采用单道地震关键处理技术, 极大地提高了资料的信噪比和分辨率; 刘建勋^[32]在资料处理中采用有效的方

收稿日期: 2021-08-30; **修回日期:** 2022-05-18

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFF01013500); 中国地质调查局地质调查项目(DD20208001、DD20208002、ZD20220115); 物化探所中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金资助项目(AS2020Y02)

第一作者: 岳航羽(1989-), 男, 工程师, 博士在读, 现主要从事地震数据采集、处理及综合研究工作。Email: yuehangyu_cgs@163.com

通讯作者: 张明栋(1989-), 男, 工程师, 硕士, 现主要从事水域及陆域地球物理勘查数据采集、处理、解释及综合研究工作。Email: 765021763@qq.com

法技术对数据进行信噪分离,削弱多次及绕射等干扰波的影响;林兆彬等^[33]对低频部分的噪声采用带通滤波,对高频信号中的随机噪声采用小波阈值去噪方法进行压制处理,进一步提升了单道地震的剖面质量;邢子浩等^[34]将正则化非平稳回归技术应用到单道地震多次波压制中,并证实该技术较传统匹配滤波方法在去除单道地震多次波方面更具优势。

本文将以河北雄安新区白洋淀为例,在内陆浅水区开展单道地震探测技术试验研究,构建一套内陆浅水区单道地震探测技术。通过对比试验,确定内陆浅水区单道地震采集参数,并开展剖面测量。采用针对性的单道地震数据处理方法技术组合压制各类噪声干扰,最大程度提高内陆浅水区单道地震信噪比和分辨率。通过与区内测线附近的钻孔资料对照,证实该方法技术的可行性及准确性。

1 试验区概况

为了开展内陆浅水区单道地震探测技术试验,选取河北白洋淀作为试验区,如图 1 所示。白洋淀是雄安新区最主要的水域,位于河北省中部、华北平原东南部,属于太行山前永定河冲积扇与滹沱河冲积扇的前缘低洼区,是华北平原最大的淡水湖泊,其主体位于安新县境内,流域范围为 115. 6° ~

116.5°E,38.7°~39.2°N,总面积约 366 km²。年平均气温是 12.1 ℃,属于温带大陆性季风气候^[35-36]。区内整体地势较为平坦,地势自 WN 向 ES 倾斜,地面标高多在 50 m 以下,全区地势最低洼区为白洋淀湖泊,平均深度 3~4 m。从白洋淀的南、西、北 3 个方向接纳 9 条入淀河流,分别为潞龙河、孝义河、唐河、清水河、府河、漕河、瀑河、萍河、白沟引河,出淀河流为东部的赵王新河^[37]。在天然和人为因素的作用下,淀内形成了沟壕相连、淀中有淀和水田相间分布的生态格局,主要包括藻荇淀、烧车淀、小白洋淀、捞王淀、泛鱼淀和范峪淀等^[38]。白洋淀常见的大型水生植物有 47 种,主要包括莲花、芦苇、芡实、菱角等水生植物群,其中,芦苇是淀区分布最广的植物^[39]。

试验区自新生代以来一直是我国主要沉降地区,第四系地层沉积较厚,厚度一般在 300~500 m,晚更新世以来地层主要划分为上更新统欧庄组 and 全新统。上更新统主要是以冲积相、洪积相、冲洪积相和湖相沉积为主,主要由黄色、棕黄色具有黄土状结构的黏土质粉砂、粉砂质黏土及砂砾石层组成,上更新统底界埋深在 120~170 m 之间。全新统以冲积相为主,夹有湖沼相沉积,主要由灰黄色、灰色、灰黑色含淤泥质的粉砂质黏土、黏土质粉砂、粉砂组成,常夹杂淤泥层,全新统底界埋深一般在 20~40 m^[40-41]。

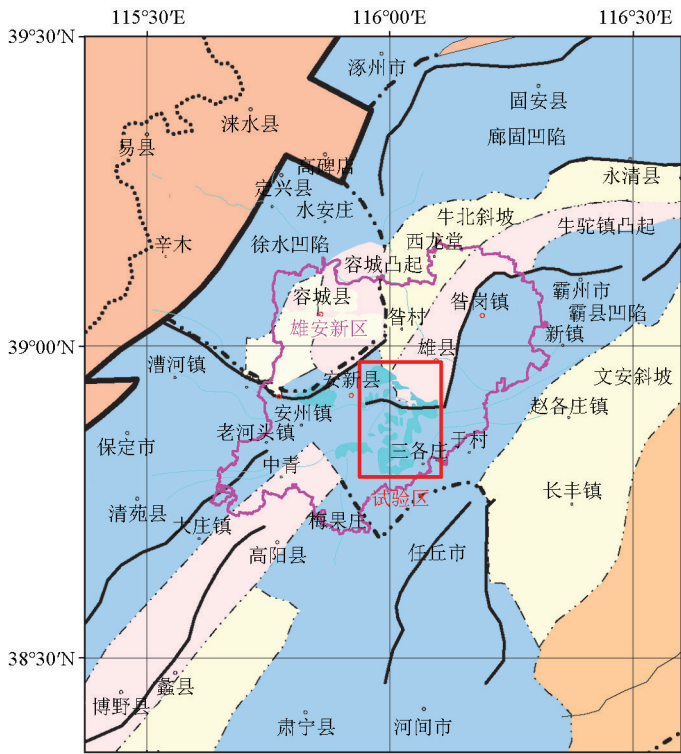


图 1 试验区位置

Fig.1 The location of the test area

2 野外数据采集试验

内陆浅水区单道地震探测技术野外采集试验采用的是英国 AAE 公司的 CSP-D 单道地震探测系统,该系统由发射和接收两部分组成;发射系统由 CSP-D 发射机和 Boomer 震源组成,接收部分由 DA4G-500 工作站及水听器电缆组成。图 2 所示为在河北白洋淀地区开展的内陆浅水区单道地震探测试验的现场工作图,进行单道地震数据采集施工作

业时首先分别投放 Boomer 激发震源和水听器电缆,如图 2a 和 2b 所示;其次,为了最大限度地避免船只发动机干扰及螺旋桨激起的水花影响,将 Boomer 震源和水听器电缆并排拖于船后 20 m 处,如图 2c 所示,采用拖曳式连续观测方式施工作业,数据采集过程中拖曳船只尽量保持匀速航行以减少噪声影响。利用 GPS 实时监控船只航行轨迹是否偏离测线,同时对观测的数据质量进行实时把控,尽量保证记录的地层信号连贯清晰。



a—投放 Boomer 激发震源;b—投放水听器电缆;c—拖曳式单道地震数据采集
a—release the Boomer source;b—drop the hydrophone cable;c—towed single-channel seismic acquisition

图 2 内陆浅水区单道地震探测现场工作

Fig.2 Field work diagram of single-channel seismic detection in inland shallow water area

为了达到最佳的内陆浅水区单道地震探测效果,精细探测河北白洋淀水域全新统浅层地质结构的目的,对关键的采集参数进行对比试验,主要包括激发能量、激发间隔、航行速度以及接收单元个数等,以确定最优的参数组合开展白洋淀单道地震探测试验研究。

2.1 激发能量对比

内陆浅水区单道地震试验的探测深度及噪声压制水平直接受震源激发能量大小的影响,需要开展

内陆浅水区单道地震震源激发能量对比试验(图 3)。经过相同的预处理手段和参数后,通过比较不难发现,图 3a 所示的采用 100 J 的激发能量对多次波的压制效果不甚理想,单道地震剖面上多次波较发育,如绿色箭头所示;图 3b 所示的采用 200 J 的激发能量对地层刻画的连续性较差,单道地震剖面上出现明显的地层间断不连续现象,如蓝色箭头所示;相比之下,图 3c 所示的采用 300 J 的激发能量的探测效果较理想,有效波反射凸出,同相轴连续性较好。

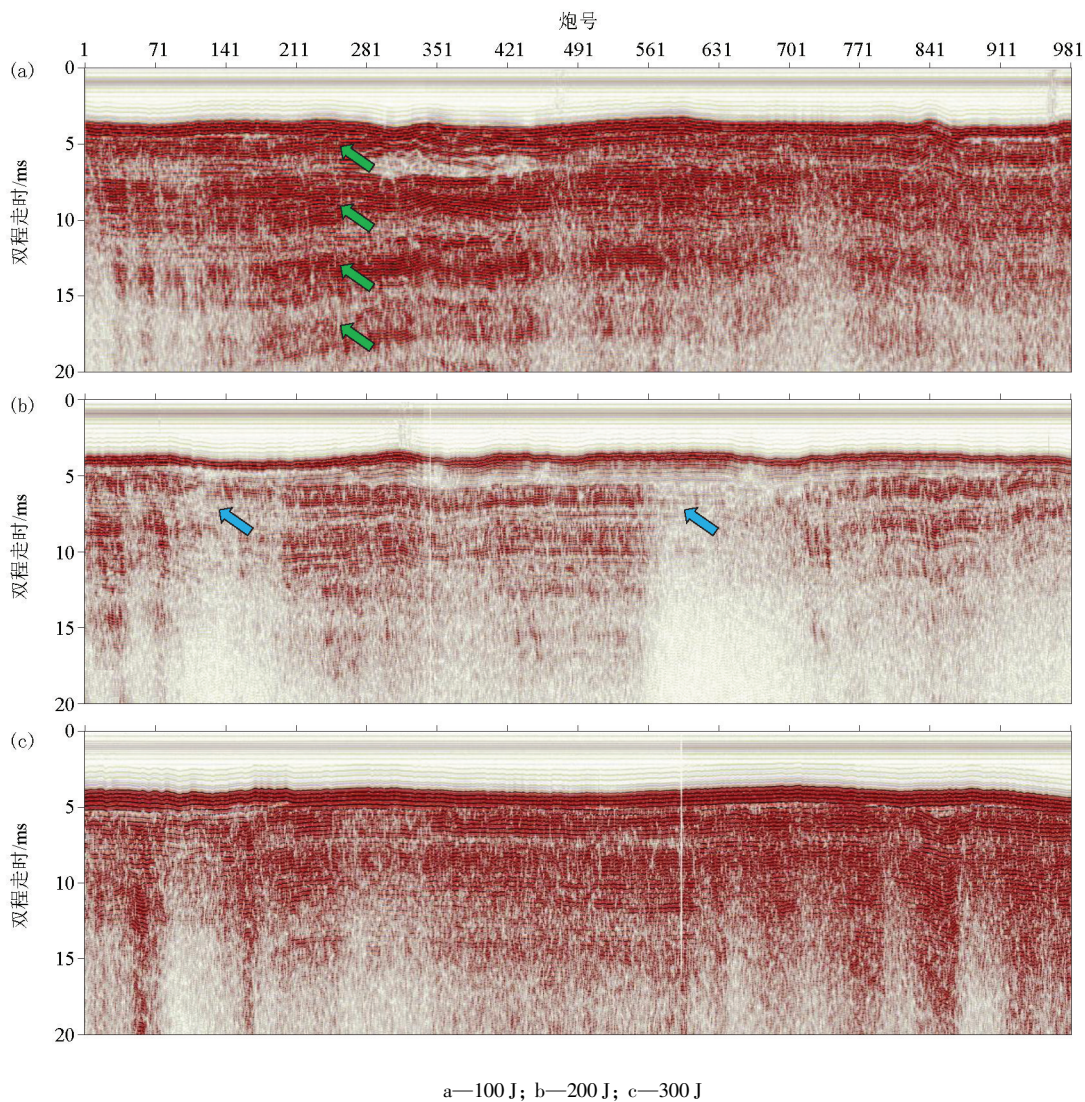


图 3 不同激发能量的单道地震剖面对比

Fig.3 Comparison of single-channel seismic profiles with different source energy

2.2 激发间隔对比

Boomer 激发间隔的长短直接影响着内陆浅水区单道地震探测的水下地层界面的连续性,因此需要控制其他采集参数不变的情况下比较不同震源激发间隔的实际效果。图 4 所示为在河北白洋淀地区单道地震探测试验中不同激发间隔的剖面对比,依次采用了 333 ms、400 ms 以及 533 ms 这 3 个档位。通过对比发现,如图 4a 所示的采用 333 ms 激发间隔单道地震剖面上白洋淀水底界面以及水下地层界面的横向连续性都较好,未出现明显间断区域;然而,图 4b 中黄色箭头所示和图 4c 中绿色箭头所示的区域都出现了不同程度的地层界面横向间断区域,连续性均不如 333 ms 的结果。因此,在内陆浅水区开展单道地震探测研究时在保障发射机电容充饱的前提下,应尽量缩短震源激发间隔,才能有效保

证单道地震成像效果的横向连续性。

2.3 航行速度对比

拖曳船只的航行速度是单道地震探测中关键影响因素之一,船速过快会在水面激起较大浪花,严重影响船尾拖曳的设备的数据采集质量。因而在进行内陆浅水区单道地震数据采集过程中,应采用合理的船速,既保障单道地震的数据采集质量,又保障施工作业采集效率。图 5 为在相同水域分别采用 3 节和 4 节的船速得到的单道地震剖面效果,如图中黄色箭头所示,采用 4 节的船速不仅 4 ms 附近的水底界面连续性较差,而且水下地层界面也无法得到有效显现。因而,在内陆浅水区进行单道地震探测试验时应尽量控制拖曳船只的航行速度,控制在 3 节左右的船速,并匀速直线行驶。

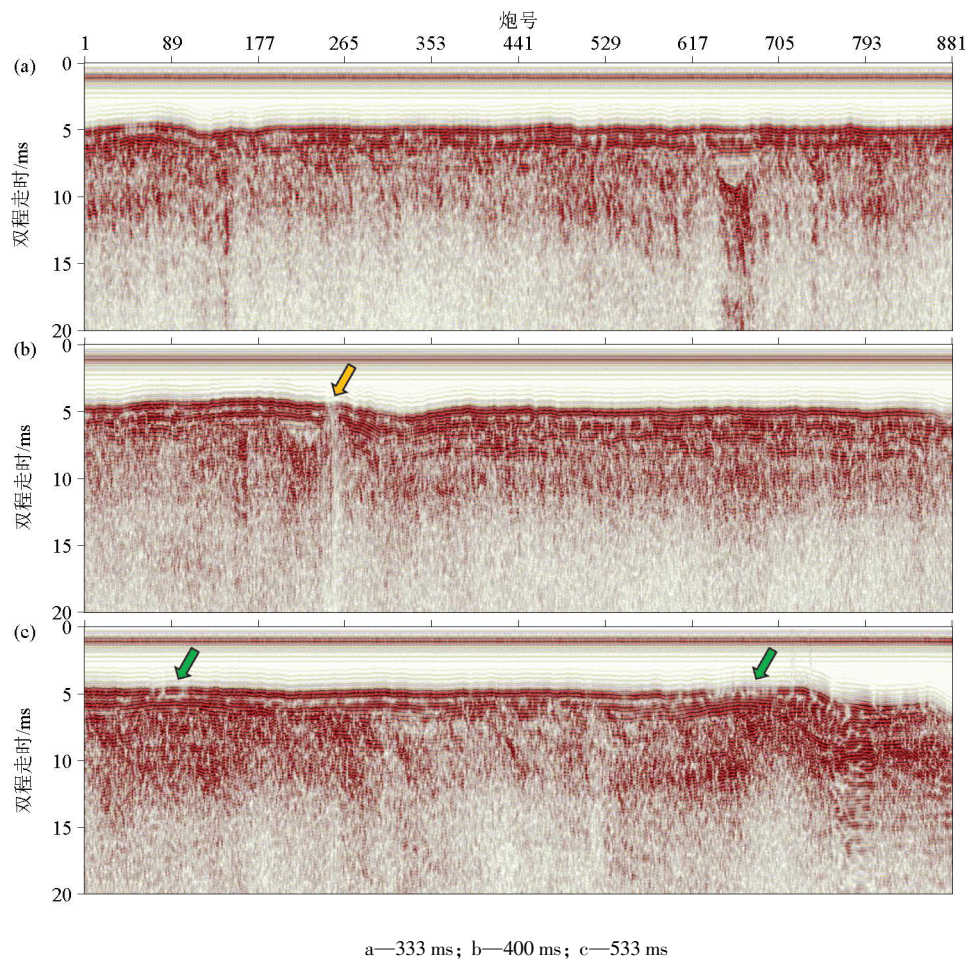


图 4 不同激发间隔的单道地震剖面对比

Fig.4 Comparison of single-channel seismic profiles with various excitation interval

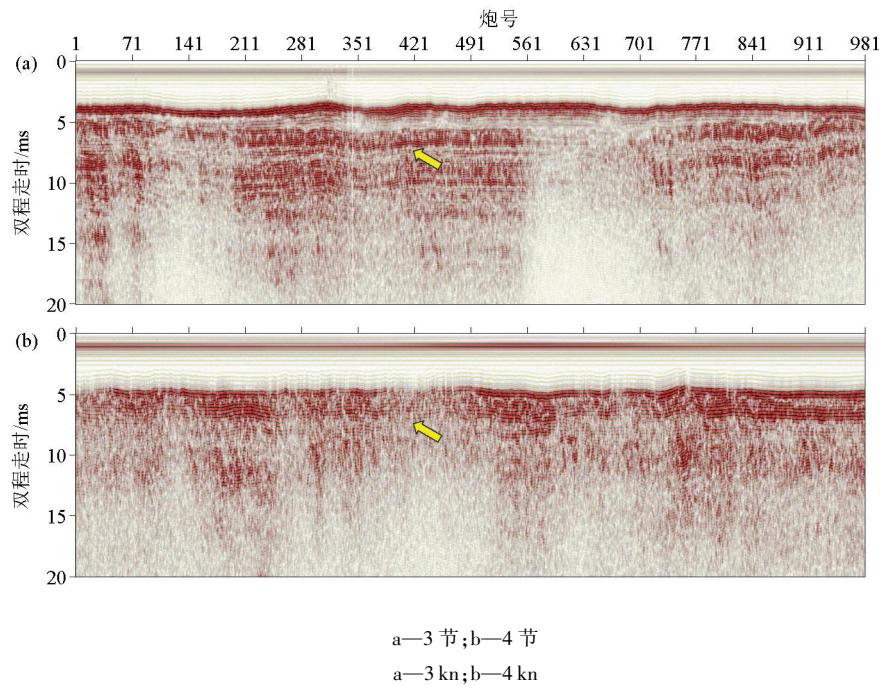


图 5 不同航行速度的单道地震剖面对比

Fig.5 Comparison of single-channel seismic profiles with different sailing speed

2.4 接收单元个数对比

单道地震探测中水听器电缆接收单位个数直接控制着数据采集过程中的有效叠加次数,图 6a 和 6b 为分别采用 16 单元和 24 单元接收的水听器电缆的单道地震剖面对比。通过比较可以直观发现,16 单元的水听器电缆剖面结果虽然整体频率较高,

但是蓝色箭头所指示的水下有效反射界面无法准确刻画,而采用 24 单元的水听器电缆可以有效识别该地层界面,说明 16 单元的水听器电缆较 24 单元的有效叠加次数少,造成其接收信号能力有限。因此,将采用 24 单元的水听器电缆在河北白洋淀地区开展内陆浅水区单道地震探测技术研究。

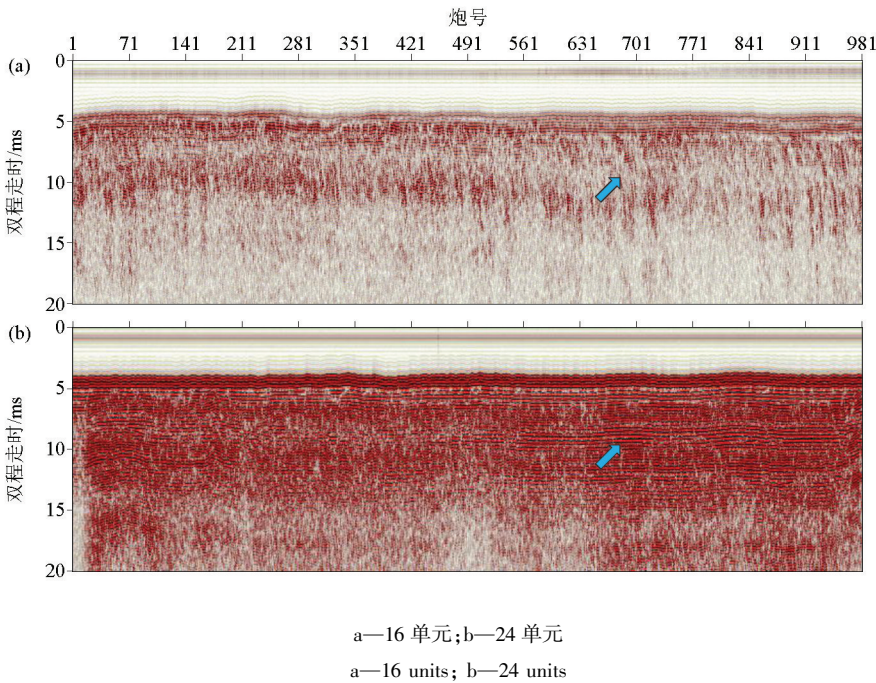


图 6 不同接收单元个数的单道地震剖面对比

Fig.6 Comparison of single-channel seismic profiles with various receiving units

通过在河北雄安新区白洋淀地区的单道地震探测野外数据采集对比试验,最终确定了该地区单道地震探测的采集参数主要包括:Boomer 激发能量 300 J、333 ms 间隔激发、3 节的行船速度以及采用 24 单元的水听器电缆接收,并开展内陆浅水区单道地震剖面测量工作。

3 数据处理关键技术

针对内陆浅水区单道地震探测试验数据特点及处理难点,本文制定了一套白洋淀单道地震数据处理流程如图 7 所示。数据处理过程中以保真处理手段为主,主要包括带通滤波、多次波压制以及信号增强技术等,最大程度地提高内陆浅水区单道地震反射波信噪比及分辨率,使其能够更直观地反映地层的形态特征,为后续单道地震资料解释提供真实可靠的数据支撑。

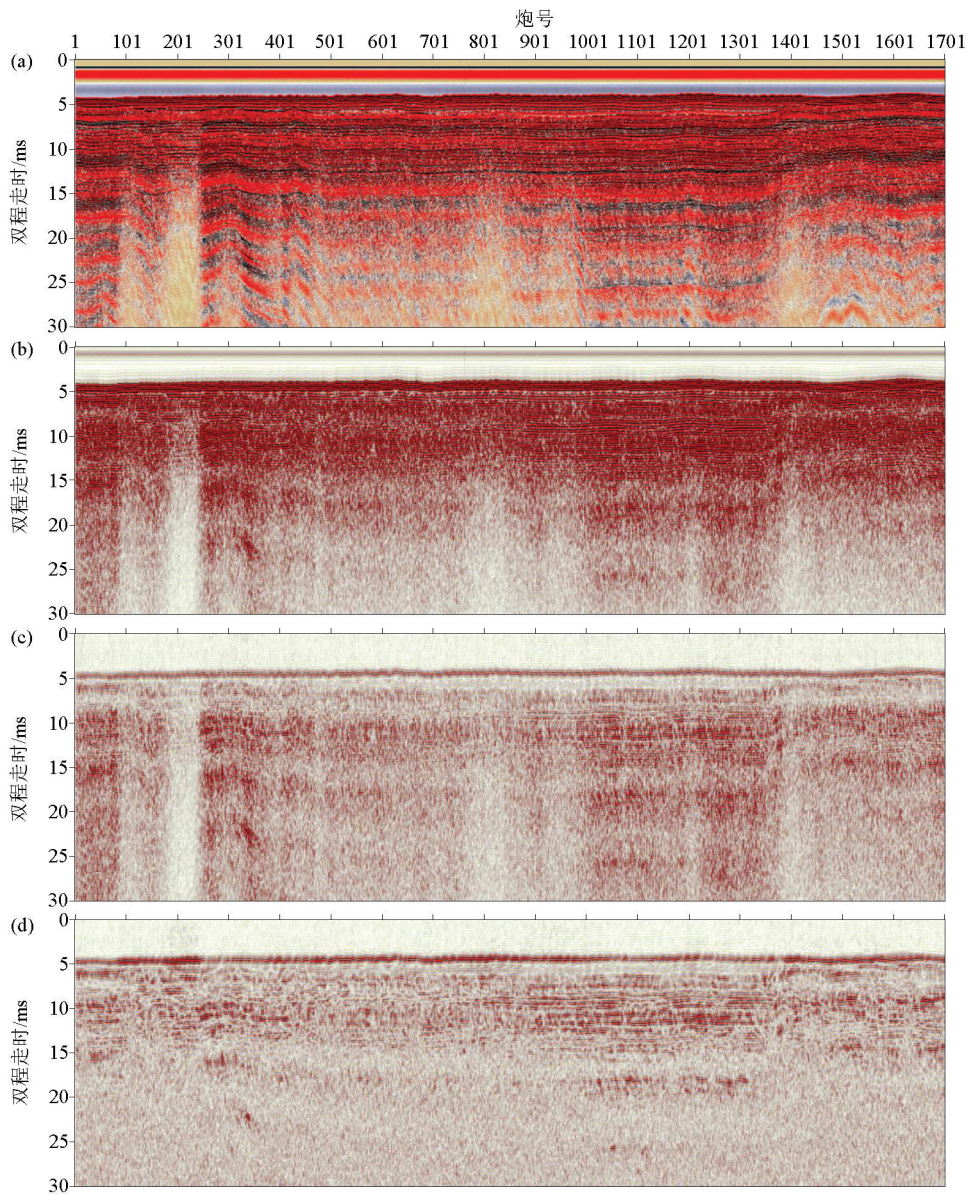
图 8 和图 9 分别是采用图 7 中的内陆浅水区单道地震探测数据处理关键技术后的效果对比及频谱对比。图 8a 中的白洋淀单道地震原始数据干扰严



图 7 内陆浅水区单道地震探测数据处理关键技术及流程

Fig.7 Key technology and process of of single-channel seismic data processing in inland shallow water area

重,多次波发育,信噪比极低,几乎难以发现有效反射,图 9a 所示的频谱图上可见较为明显的低频及高频噪声成分。采用 400~2 500 Hz 的带通滤波后,内陆浅水区单道地震剖面的噪声干扰得到一定程度地压制,有效波反射同相轴得到部分显现,信噪比得到一定程度地提升,特别是高低频噪声得到有效压制,如图 8b 和图 9b 所示。通过采用单道预测反褶积与一维 SRME 技术相结合的方法,能够有效衰减单道地震剖面的多次波干扰,剔除由多次波发育带来的地质假象,进一步提高单道地震剖面的信噪比,如图 8c 所示;同时,相较于图 9b,图 9c 的主频从 1 300 Hz 提高到了 1 600 Hz,有效频带宽度也得到相应拓宽,有效地提高了内陆浅水区单道地震的分辨率。最后,采用信号增强技术在内陆浅水区单道地震剖面



a—原始数据;b—带通滤波;c—多次波压制;d—信号增强
a—raw data;b—bandpass filtering;c—multiple suppression;d—signal enhancement

图 8 内陆浅水区单道地震探测不同数据处理方法的效果对比

Fig.8 Result comparison of different data processing methods for single-channel seismic detection in inland shallow water

的横向和纵向上对有效信号进行补偿增强,进一步压制随机噪声干扰,突出有效反射信息,增强单道地震剖面地层连续性,如图 8d 所示,其对应的频谱特征图 9d 也得到细微的改变,为河北白洋淀单道地震探测剖面地质解释提供真实可靠的物探数据保障。

4 试验效果地质解释

将数据处理后的单道地震时间剖面转化为深度剖面,根据反射特征划分对应的地层界面,结合测线附近钻探资料推测相应地层的组成成分。图 10 所示为内陆浅水区单道地震探测试验效果,根据经验

河北白洋淀地区浅层按照 1 700 m/s 的速度进行时深转化,精细划分浅层地质结构。

如图 10a 所示,根据单道地震剖面反射特征,河北白洋淀 20 m 以浅共有效识别了全新统 7 套地层反射界面并确定了各层位所处的埋深位置,其中红色线所示的水底界面深度 4 m 左右;同时,确定了各层起伏特征,各层整体较平坦,仅局部有起伏。根据测线附近的钻探资料,如图 10b 所示,所识别的地层界面与钻探资料表征的地层界面吻合较好,有效推测各个层位的组成成分,主要是以第四系地层水系沉积物为主,包括粉土、粉质黏土、黏土质粉砂、细砂、中砂等。

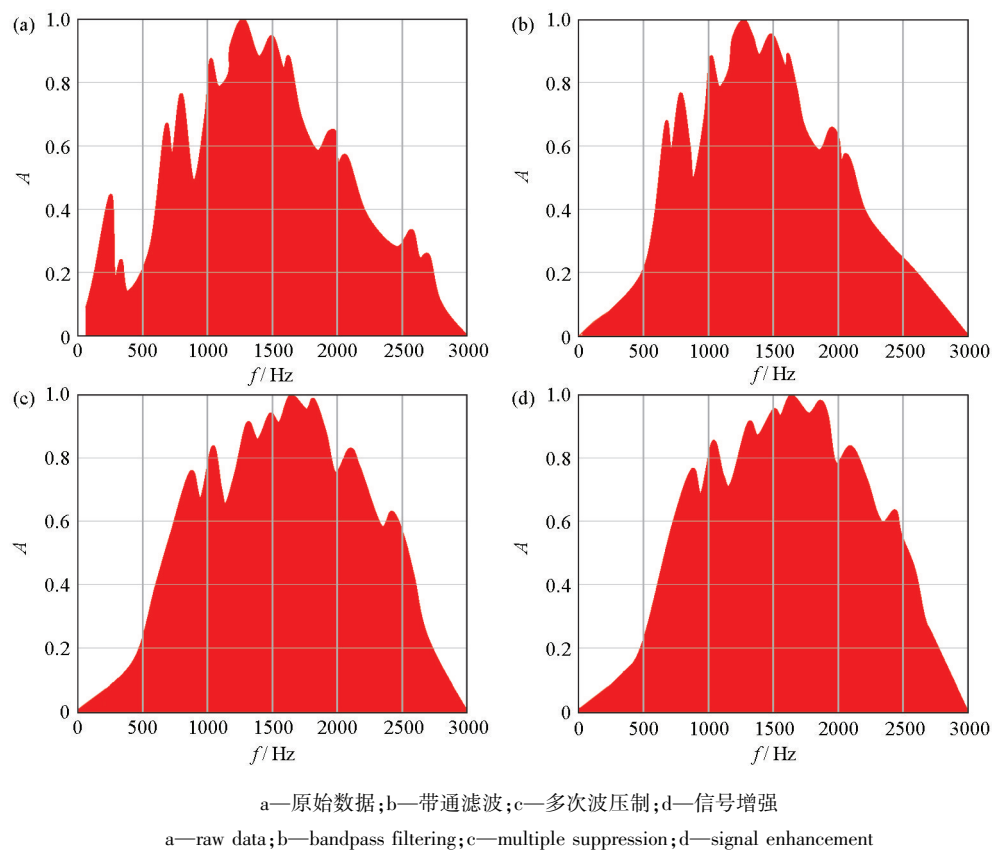


图 9 内陆浅水区单道地震探测不同数据处理方法的频谱对比

Fig.9 Spectrum comparison of different data processing methods for single-channel seismic detection in inland shallow water

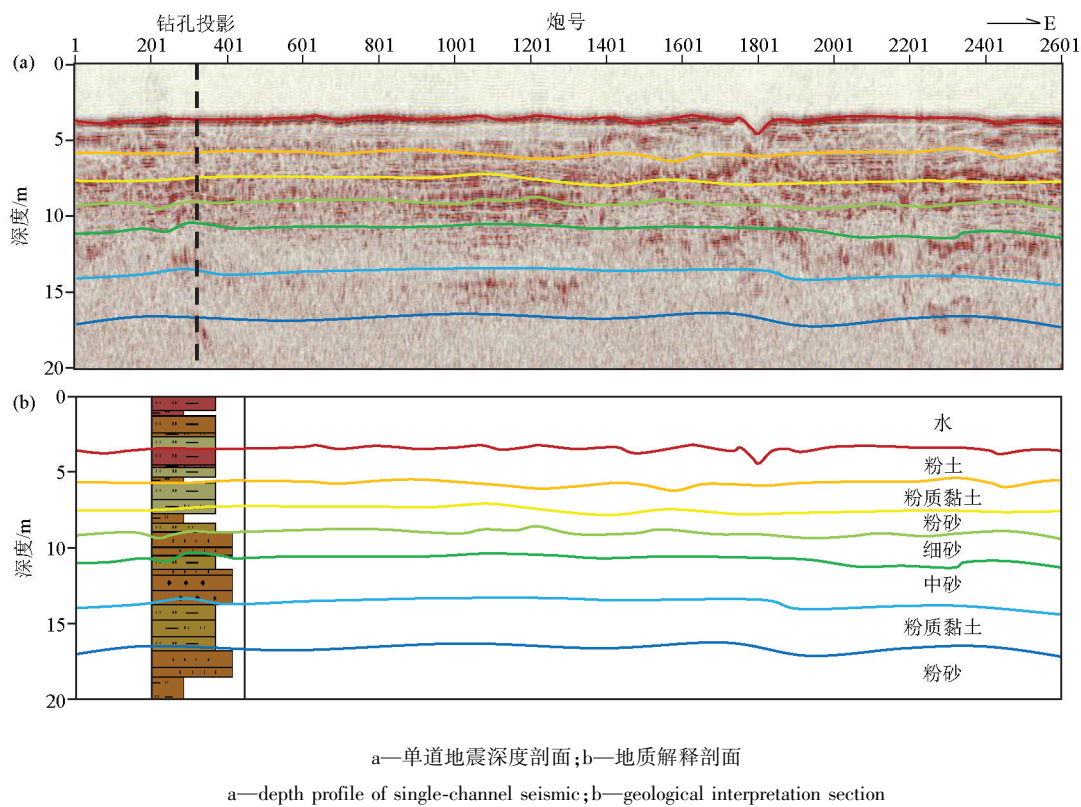


图 10 内陆浅水区单道地震探测试验效果

Fig.10 The result of single-channel seismic detection in inland shallow water area

5 结论

1) 以河北雄安新区白洋淀为例,开展了内陆浅水区单道地震探测技术试验研究工作。在野外数据采集方面,定性对比了激发能量、激发间隔、航行速度以及接收单元个数的实际效果,优化了内陆浅水区单道地震探测采集参数。

2) 依据白洋淀单道地震数据处理难点,制定了一套内陆浅水区单道地震数据处理流程及方法技术组合,主要包括带通滤波、多次波压制以及信号增强技术等,逐步衰减各类干扰噪声,最大程度地提高单道地震剖面的信噪比及分辨率。

3) 通过高分辨率的内陆浅水区单道地震探测剖面反射特征,精细划分了水域浅层地质结构,结合钻探资料不仅能够验证该方法的准确性,还推测了相应地层的组成成分,有效地支撑了内陆水域环境地质调查及水域地下空间探测。

参考文献 (References):

- [1] 杨慧良,陆凯,褚宏宪,等.海洋地质地球物理调查技术方法发展趋势探讨[J].海洋地质前沿,2019,35(9):1-5.
Yang H L, Lu K, Chu H X, et al. Future development trend of marine geological and geophysical survey techniques and methods [J]. Marine Geology Frontiers, 2019, 35(9): 1-5.
- [2] Zhao W N, Zhang X H, Wang Z B, et al. Quaternary high-resolution seismic sequence based on instantaneous phase of single-channel seismic data in the South Yellow Sea, China [J]. Quaternary International, 2018, 468(A): 4-13.
- [3] 李军峰,肖都,孔广胜,等.单道海上反射地震在海上物探工程中的应用[J].物探与化探,2004,28(4):365-368.
Li J F, Xiao D, Kong G S, et al. The application of single-channel marine reflection seismic survey to marine geophysical exploration [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2004, 28(4): 365-368.
- [4] 李军峰,李文杰,孟庆敏,等.高分辨率单道海上地震在香港海域沉积结构勘查中的应用[J].物探与化探,2007,31(1):90-94.
Li J F, Li W J, Meng Q M, et al. The application of high resolution single channel marine seismic to the exploration offshore Quaternary superficial deposits in Hong Kong waters [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2007, 31(1): 90-94.
- [5] 褚宏宪,杨源,张晓波,等.高分辨率单道地震调查数据采集技术方法[J].海洋地质前沿,2012,28(12):70-74.
Chu H X, Yang Y, Zhang X B, et al. Data acquisition technique for high resolution single-channel seismic survey [J]. Marine Geology Frontiers, 2012, 28(12): 70-74.
- [6] 李丽青,唐卫,陈泓君,等.高分辨率单道地震剖面上定标号的计算方法[J].地球物理学进展,2012,27(5):1871-1880.
Li L Q, Tang W, Chen H J, et al. Computing method of marked line number for high resolution single-channel seismic section [J]. Progress in Geophysics, 2012, 27(5): 1871-1880.
- [7] 陈珊珊,吴志强,郭兴伟,等.大陆架科学钻探南黄海陆架区首钻 300m 选位研究[J].海洋地质与第四纪地质,2014,34(3):31-38.
Chen S S, Wu Z Q, Guo X W, et al. Site survey for the first 300 m coring hole of the China continental scientific drilling program in the Southern Yellow Sea (SYS) [J]. Marine Geology and Quaternary Geology, 2014, 34(3): 31-38.
- [8] 韦成龙,张珂,余章馨,等.珠江口外海域与珠江三角洲晚更新世以来的地层层序对比[J].沉积学报,2015,33(4):713-723.
Wei C L, Zhang K, Yu Z X, et al. Correlation of stratigraphic sequences between the Pearl River Delta and its offshore continental shelf since the Late Pleistocene [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2015, 33(4): 713-723.
- [9] 赵维娜,张训华,吴志强,等.三瞬属性在南黄海第四纪地震地层分析中的应用[J].海洋学报,2016,38(7):117-125.
Zhao W N, Zhang X H, Wu Z Q, et al. Application of three instantaneous attributes in the analysis of Quaternary seismic strata in the southern Yellow Sea [J]. Haiyang Xuebao, 2016, 38(7): 117-125.
- [10] 聂鑫,罗伟东,周娇.南海东北部澎湖峡谷群沉积特征[J].海洋地质前沿,2017,33(8):18-23.
Nie X, Luo W D, Zhou J. Depositional characteristics of the Penghu Submarine Canyon in the northeastern South China Sea [J]. Marine Geology Frontiers, 2017, 33(8): 18-23.
- [11] 冯英辞,詹文欢,姚衍桃,等.西沙群岛礁区的地质构造及其活动性分析[J].热带海洋学报,2015,34(3):48-53.
Feng Y C, Zhan W H, Yao Y T, et al. Analysis of tectonic movement and activity in the organic reef region around the Xisha Islands [J]. Journal of Tropical Oceanography, 2015, 34(3): 48-53.
- [12] 陈江欣,侯方辉,李日辉,等.渤海海域中西部新构造运动特征[J].海洋地质与第四纪地质,2018,38(4):83-91.
Chen J X, Hou F H, Li R H, et al. Neotectonics in the western and central Bohai Sea [J]. Marine Geology and Quaternary Geology, 2018, 38(4): 83-91.
- [13] 马胜中.浅层地球物理方法在广西钦州湾-北海海域断层探测的应用[J].海洋技术,2010,29(6):20-24.
Ma S Z. Application of shallow geophysical method to detect active fault in nearshore of Qingzhou Bay-Beihai [J]. Ocean Technology, 2010, 29(6): 20-24.
- [14] 陆凯,侯方辉,李日辉,等.利用单道地震研究黄、渤海海域的活动断裂[J].海洋地质前沿,2012,28(8):27-30.
Lu K, Hou F H, Li R H, et al. Using single-channel seismic for active faults investigation in Yellow Sea and Bohai Sea [J]. Marine Geology Frontiers, 2012, 28(8): 27-30.
- [15] 吴德城,侯方辉,祁江豪,等.中国近海新构造活动断裂调查与地震勘探方法[J].海洋地质与第四纪地质,2020,40(6):121-132.
Wu D C, Hou F H, Qi J H, et al. Seismic survey and exploration methods for Neotectonic active faults in the area off China continent [J]. Marine Geology and Quaternary Geology, 2020, 40(6): 121-

132.

[16] 栾锡武,秦蕴珊.冲绳海槽宫古段西部槽底海底气泉的发现[J].科学通报,2005,50(8):802-810.

Luan X W, Qin Y S. Discovery of submarine gas springs in the western miyako section of Okinawa Trough [J]. Chinese Science Bulletin, 2005, 50(8): 802-810.

[17] 周其坤,孙永福,宋玉鹏,等.渤海湾某海洋平台场址浅层气分布与成因[J].地质通报,2021,40(2/3):298-304.

Zhou Q K, Sun Y F, Song Y P, et al. Distribution of shallow gas at an offshore platform site in Bohai Bay and its genetic mechanism [J]. Geological Bulletin of China, 2021, 40(2/3): 298-304.

[18] 傅人康,张匡华,宋家伟.利用侧扫声呐和单道地震提取海底微地貌的方法[J].海洋开发与管理,2018,4:109-112.

Fu R K, Zhang K H, Song J W. The method of extracting seabed microtopography information from side scan sonar pictures and single-channel seismic profiles[J]. Ocean Development and Management, 2018, 4: 109-112.

[19] 孙美静,罗伟东,钟和贤,等.厦门湾口外近岸陆架区海底沙波发育特征[J].海洋地质与第四纪地质,2021,41(2):43-52.

Sun M J, Luo W D, Zhong H X, et al. Sand waves in the shelf area off Xiamen Bay [J]. Marine Geology and Quaternary Geology, 2021, 41(2): 43-52.

[20] 侯方辉,王保军,孙建伟,等.渤海海峡跨海通道新构造运动特征及其工程地质意义[J].海洋地质前沿,2016,32(5):25-30.

Hou F H, Wang B J, Sun J W, et al. Neotectonic movement across the Bohai Strait and its engineering geologic significance [J]. Marine Geology Frontiers, 2016, 32(5): 25-30.

[21] 刘保华,丁继胜,裴彦良,等.海洋地球物理探测技术及其在近海工程中的应用[J].海洋科学进展,2005,23(3):374-384.

Liu B H, Ding J S, Pei Y L, et al. Marine geophysical survey techniques and their applications to offshore engineering[J]. Advances in Marine Science, 2005, 23(3): 374-384.

[22] 刘长春,李攀峰,孙军,等.渤海海峡地区高分辨率地震层序特征及其古环境演化[J].地球物理学进展,2020,35(6):2373-2383.

Liu C C, Li P F, Sun J, et al. High-resolution seismic sequence characteristics and its paleoenvironmental evolution in the Bohai Straits [J]. Progress in Geophysics, 2020, 35(6): 2373-2383.

[23] 张莉,李文成,沙志彬.琼州海峡跨海工程新VII线区地质条件及地质灾害因素评价[J].海洋地质与第四纪地质,2005,25(2):17-23.

Zhang L, Li W C, Sha Z B, et al. Evaluation of geological condition and potential geohazard factors in new line VII survey area of crossing Qiongzhou Strait engineering[J]. Marine Geology and Quaternary Geology, 2005, 25(2): 17-23.

[24] 罗昆,陈卫,韩孝辉.海南岛南部浅海地质灾害调查方法研究[J].海洋开发与管理,2018,35(3):51-55.

Luo K, Chen W, Han X H, et al. Investigation method of geological disasters in the southern shallow sea of Hainan Island [J]. Ocean Development and Management, 2018, 35(3): 51-55.

[25] Fink C R, Spence G D. Hydrate distribution off Vancouver Island from multifrequency single-channel seismic reflection data [J]. Journal of Geophysical Research, 1999, 104(B2): 2909-2922.

[26] 李守军,初凤友,方银霞,等.南海北部陆坡神狐海域浅地层与单道地震剖面联合解释——水合物区沉积地层特征[J].热带海洋学报,2010,29(4):56-62.

Li S J, Chu F Y, Fang Y X, et al. Associated interpretation of sub-bottom and single-channel seismic profiles from slope of Shenhu Area in the northern South China Sea-characteristics of gas hydrate sediment [J]. Journal of Tropical Oceanography, 2010, 29(4): 56-62.

[27] 韩孝辉,李亮,刘刚,等.海南岛万宁东部近海铅钛砂矿赋存特征[J].中国矿业,2017,26(S2):186-189.

Han X H, Li L, Liu G, et al. Occurrence characteristics of offshore Zr-Ti placer deposits in eastern Wanning of Hainan Island [J]. China Mining Magazine, 2017, 26(S2): 186-189.

[28] 韩孝辉,薛玉龙,刘刚.海上风电场建设的前期地质调查研究方法[J].工程勘察,2018,3:29-34.

Han X H, Xue Y L, Liu G. Study methods for preliminary geological survey of the construction of offshore wind farms [J]. Geotechnical Investigation and Surveying, 2018, 3: 29-34.

[29] 刘玉萍,李丽青,赵斌,等.海洋低信噪比单道地震资料特点及处理策略[J].海洋地质前沿,2019,35(7):25-33.

Liu Y P, Li L Q, Zhao B, et al. The characteristics and processing methods of marine single-channel seismic data with low SNR [J]. Marine Geology Frontiers, 2019, 35(7): 25-33.

[30] 李丽青,徐华宁,舒虎.涌浪静校正技术在海洋单道地震资料处理中的应用[J].物探与化探,2007,31(4):339-343.

Li L Q, Xu H N, Shu H. The application of the wave static correction method to marine single-channel seismic data processing [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2007, 31(4): 339-343.

[31] 李丽青,陈泓君,彭学超,等.海洋区域地质调查中的高分辨率单道地震资料关键处理技术[J].物探与化探,2011,35(1):86-92.

Li L Q, Chen H J, Peng X C, et al. The marine processing methods of high-resolution single-channel seismic data in marine regional geological survey [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2011, 35(1): 86-92.

[32] 刘建勋.提高海上单道反射地震记录信噪比和分辨率的方法技术[J].物探化探计算技术,2007,29(S):116-120.

Liu J X. The technique of improving single-to-noise ratio and resolution for marine seismic profiling [J]. Computing techniques for Geophysical and Geochemical Exploration, 2007, 29(S): 116-120.

[33] 林兆彬,胡毅,郑江龙,等.小波变换压制噪声在单道地震资料处理中的应用[J].应用海洋学学报,2018,37(1):113-119.

Lin Z B, Hu Y, Zheng J L, et al. Application of wavelet transform for noise suppression in single-channel seismic data processing [J]. Journal of Applied Oceanography, 2018, 37(1): 113-119.

[34] 邢子浩,陈靓,杨德鹏,等.基于正则化非平稳回归技术的自适应匹配相减在单道地震多次波压制中的应用[J].海洋地质前沿,2021,37(2):70-76.

Xing Z H, Chen L, Yang D P, et al. Application of adaptive matching subtraction based on regularized nonstationary regression in single channel seismic multiples attenuation [J]. Marine Geology

Frontiers, 2021, 37(2): 70–76.

[35] 王永, 闵隆瑞, 董进, 等. 河北白洋淀全新统沉积特征与地层划分[J]. 地球学报, 2015, 36(5): 575–582.

Wang Y, Min L R, Dong J, et al. Sedimentary characteristics and stratigraphic division of Holocene series in Baiyang Dian, Hebei Province [J]. Acta Geoscientia Sinica, 2015, 36(5): 575–582.

[36] 陈亭亭, 杨振京, 刘荣访, 等. 白洋淀 ZK-1 钻孔晚更新世以来的粒度特征及其沉积环境分析[J]. 河北地质大学学报, 2017, 40(6): 1–7.

Chen T T, Yang Z J, Liu R F, et al. Grain size characteristics and sedimentary environment analysis of Baiyangdian ZK-1 borehole since Late Pleistocene[J]. Journal of Hebei Geo University, 2017, 40(6): 1–7.

[37] 易雨君, 林楚翹, 唐彩红. 1960s 以来白洋淀水文、环境、生态演变趋势[J]. 湖泊科学, 2020, 32(5): 1333–1347.

Yi Y J, Lin C Q, Tang C H, et al. Hydrology, environment and ecological evolution of Lake Baiyangdian since 1960s[J]. Journal of Lake Sciences, 2020, 32(5): 1333–1347.

[38] 王雨山, 尹德超, 王旭清, 等. 雄安新区白洋淀湿地地表水和地下水转化关系及其对芦苇分布的影响[J]. 中国地质, 2021, 48(5): 1368–1381.

Wang Y S, Yin D C, Wang X Q, et al. Groundwater-surface water interactions in the Baiyangdian wetland, Xiong'an New Area and its impact on reed land[J]. Geology in China, 2021, 48(5): 1368–1381.

[39] 马震, 夏雨波, 李海涛, 等. 雄安新区自然资源与环境-生态地质条件分析[J]. 中国地质, 2021, 48(3): 677–696.

Ma Z, Xia Y B, Li H T, et al. Analysis of natural resources and environment eco-geological conditions in the Xiong'an New Area[J]. Geology in China, 2021, 48(3): 677–696.

[40] 赵志轩. 白洋淀湿地生态水文过程耦合作用机制及综合调控研究[D]. 天津: 天津大学, 2012.

Zhao Z X. Coupling mechanism of eco-hydrological processes and integrated regulation in Baiyangdian Wetland[D]. Tianjin: Tianjin University, 2012.

[41] 张超. 河北平原中南部晚更新世以来古湖泊演化初探[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2020.

Zhang C. Preliminary study on the paleolake evolution of middle and south Hebei Plain since Late Pleistocene[D]. Beijing: China University of Geosciences(Beijing), 2020.

An experimental study on the high-resolution single-channel seismic exploration technology for inland shallow waters

YUE Hang-Yu^{1,2,3,4}, ZHANG Ming-Dong⁵, ZHANG Bao-Wei^{1,2,3}, WANG Guang-Ke^{2,3},
WANG Xiao-Jiang^{2,3}, LIU Dong-Ming^{2,3}

(1.Center for Geophysical Survey, China Geological Survey, Langfang 065000, China; 2.Institute of Geophysical and Geochemical Exploration, Chinese Academy of Geological Sciences, Langfang 065000, China; 3.National Center for Geological Exploration Technology, Langfang 065000, China; 4.School of Geophysics and Information Technology, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China; 5.Geological Exploration Technology Institute of Jiangsu Province, Nanjing 210049, China)

Abstract: With the advantages of flexible configuration, convenience, high efficiency, and resolution, the single-channel seismic detection technology has been widely used in marine geological surveys and offshore engineering geophysical prospecting. However, there are few cases of the application of this technology in inland rivers and lakes. Therefore, an experimental study on the high-resolution single-channel seismic detection technology targeting the inland shallow waters of Baiyangdian Lake, Xiongan New Area, Hebei Province was conducted. The application effects using key acquisition parameters, including excitation energy, excitation interval, sailing speed, and the number of receiving units, were compared to determine the optimal parameter combination. A set of single-channel seismic data processing processes and methods for inland shallow waters were developed to gradually attenuate all kinds of noises and improve the signal-to-noise ratio and resolution to the greatest extent. The experimental results show that the single-channel seismic detection technology for inland shallow waters can finely divide the shallow stratigraphic structure in the waters. Moreover, the division effects agree well with drilling data. Therefore, this technology can effectively support the investigations of environment, geology, and geologic hazards in inland rivers and lakes.

Key words: inland shallow water area; high resolution; single-channel seismic; geological structure in shallow waters

(本文编辑: 叶佩)