

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2020091101

中国近海新构造活动断裂调查与地震勘探方法

吴德城^{1,2}, 侯方辉^{2,3}, 祁江豪^{2,3}, 朱晓青^{2,3}

1. 中国石油大学(华东)地球科学与技术学院, 青岛 266580

2. 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, 青岛 266071

3. 中国地质调查局青岛海洋地质研究所, 青岛 266071

摘要: 中国近海处于大洋板块与大陆板块作用的关键区域, 新构造运动频繁, 活动断裂是其主要的表现形式之一。浅地层剖面仪测量、单道地震、多道地震和海底地震仪探测(OBS)等海洋地震勘探方法是调查研究海域活动断裂的主要地球物理手段, 各自具有不同技术优势和探测功能, 在海域活动断裂调查研究中发挥了重要作用。通过OBS广角反射/折射深地震探测和长排列多道地震勘探, 获得了中国近海的区域深大断裂展布特征, 深化了深大断裂形成与演化的深部动力学机理的认识, 进而分析了其对活动断裂控制与约束关系。根据活动断裂时代新、埋藏浅的特点, 综合利用浅地层剖面仪测量、单道地震和高分辨率多道地震方法, 获得了中国近海海域活动断裂的分布、走向和差异升降等特征, 分析了新构造运动的演化规律。本文综述了海洋地震勘探技术方法的主要特点和功能, 及其在海域活动断裂调查中的功能和作用, 总结了利用地震勘探技术方法在中国近海新构造活动断裂调查研究中取得的主要成果, 提出了在未来的海域新构造运动地震调查研究中, 应采用多技术方法组合系统调查与研究的思路, 着力提高地震勘探的精度, 探索应用横波地震勘探和海底可控震源等新技术的建议。

关键词: 活动断裂; 地震探测; 新构造; 海底地震仪; 综合探测

中图分类号: P714

文献标识码: A

Seismic survey and exploration methods for Neotectonic active faults in the area off China continent

WU Decheng^{1,2}, HOU Fanghui^{2,3}, QI Jianghao^{2,3}, ZHU Xiaqing^{2,3}

1. School of Geosciences, China University of Petroleum, Qingdao 266580, China

2. Laboratory for Marine Mineral Resources, Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology(Qingdao), Qingdao 266071, China

3. Qingdao Institute of Marine Geology, China Geological Survey, Qingdao 266071, China

Abstract: Located in the key area of land-ocean plate interaction, offshore China is an area frequently suffered from neotectonic movement-caused disasters, and active faults are one of their main triggers. Marine seismic exploration methods such as sub-bottom profiler, single channel seismic, multi-channel seismic and ocean bottom seismometer (OBS) are the main geophysical tools used to investigate active faults offshore. Each of them has its own technical advantages and detection ranges to play roles in the investigation and study of active faults offshore. Recently, through OBS wide-angle reflection/refraction deep seismic exploration and long spread multi-channel seismic exploration, we have been able to gain the distribution patterns of regional deep-large faults in China offshore area, and the understanding of deep dynamic mechanism of the formation and evolution of deep-large faults is greatly deepened. Upon the basis, we analyzed the control and constraint relationship of active faults in this paper. Newly buried active faults are young in age and shallow in burial depth. According to the features as such, we studied in this paper the distribution pattern, strike and differential rise and fall of active faults in China offshore area with such methods as sub-bottom profiler, single-channel seismic and high-resolution multi-channel seismic. And the main characteristics and functions of marine seismic exploration techniques and methods, as well as their functions and effects in the investigation of active faults in the sea area, are summarized in addition to the main achievements obtained in the researches. It is concluded that for future marine neotectonic seismic prospecting and research, it is necessary to insist on the idea of multi-technology methods and systematic investigation, focus more on improving the accuracy of seismic exploration, and explore the application of new technology such as S-wave seismic exploration and seabed vibrator.

Key words: active fault; seismic prospecting; neotectonic; ocean bottom seismometer(OBS); joint detection

资助项目: 国家自然科学基金“琉球海沟俯冲带岩石圈结构与流体循环——海洋大地电磁与地震数据约束”(91958210); 国家海洋地质专项项目(DD20190365, DD20190377); 青岛海洋科学与技术国家实验室鳌山科技创新计划项目“亚洲大陆边缘地质过程与资源环境效应”(2015ASKJ03)

作者简介: 吴德城(1995—), 男, 硕士研究生, 主要从事海洋地质方面的研究, E-mail: wdch1234567@163.com

通讯作者: 侯方辉(1979—), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事构造地质和海洋地球物理等研究, E-mail: houfanghui3993@163.com

收稿日期: 2020-09-11; **改回日期:** 2020-10-02. 周立君编辑

第四纪以来的新构造运动是造成海洋地震频发的主要因素之一,海洋地震有时还会引发海啸,会对沿岸地区造成非常严重的损害。中国拥有近2万千米的海岸线,沿海地区人口稠密,分布着多个大、中型城市和众多的城镇,是中国经济较发达的地区。有关资料表明,中国有史以来已发生5级以上地震4000多次,其中近半强震分布于中国沿海与近海地区^[1]。研究表明,这些强震的发生,与中国近海分布着多条区域性深大断裂和活动断裂(图1)密切相关^[2-3]。因此,研究中国近海的新构造运动特征和规律,一方面为沿海地区的国民经济建设与工程建设提供技术支撑,同时,为地质灾害预测与防震减灾提供科学依据。

目前,海域新构造运动的调查与研究已成为海洋地质调查研究的重点之一。活动断裂是新构造运动作用中的主要构造表现形式^[4],它造成地层层位在空间上不同程度的错断。因此,基于地震反射波的勘探方法是经济、高效和适宜的勘探方法,目前常用的有浅地层剖面仪^[5-6]、单道地震^[7]、多道地震^[8]和海底地震仪(OBS: Ocean Bottom Seismometer)^[9]探测等地震勘探方法。应用这些方法,获得了中国近海深、浅构造耦合关系和活动断裂的展布等一系列成果,为研究海域的新构造运动机理和地震远期预测奠定了良好的基础。本文在收集大量文献的基础上,总结了不同地震勘探方法的特点及在中国近海活动断裂探测中的应用实例,提出了下一步工作的建议。

1 海洋地震勘探方法特点

1.1 浅部地层高分辨率地震探测方法

海底浅部地层高分辨率地震探测方法一般有浅地层剖面仪、单道地震、高分辨率多道地震。这些方法均是以地震波的反射理论为基础,采用在海水中人工激发地震波,压力型地震检波器接收地震反射信号的方式进行。其中,浅地层剖面仪、单道地震采用的是自激自收(零偏移距)的工作方式,得到的是垂直入射/反射的单道地震反射记录。浅地层剖面仪与单道地震的区别是震源的能量不同,其探测的分辨率和深度存在差异。

1.1.1 浅地层剖面仪探测

浅地层剖面探测是一种基于地震反射波原理,利用浅地层剖面仪(Sub-bottom Profiler System)采用连续走航的方式,探测海底之下浅部地层结构和构造的地震勘探方法^[10-12]。浅地层剖面探测的工作方式是,通过电火花等不同类型的换能器震源向海底发射不同频率(频带一般为100~10 kHz)的声波脉冲,该声波在海水和沉积层传播过程中遇到声阻抗界面,被反射返回到压电检波器并转换为数字信号后传送到记录系统中记录下来,在进行滤波处理后输出为能够反映地层声学特征的记录剖面。浅地层剖面仪探测激发地震波震源能量小、频带宽(几十赫兹到几千赫兹)、主频高(几百赫兹到上千赫兹),探测深度在100 m左右,对地层的分辨力为20~50 cm。因此,它能够反映细微的地层物性的变化和微小幅度的构造变化(图2),是探测近海底断裂的有力工具^[13]。该方法的缺点是探测深度太小,不能识别断

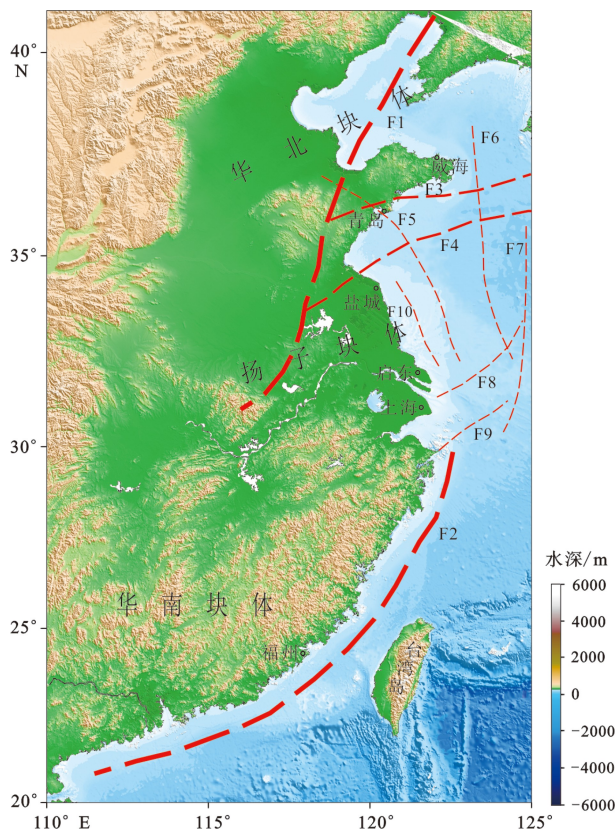


图1 中国近海区域性深大断裂和活动断裂分布示意图^[2-3]

F1. 郯庐断裂带, F2. 滨海断裂带, F3. 五莲-青岛-荣成断裂, F4. 嘉山-响水-千里岩断裂, F5. 淄博-五莲-日照断裂, F6. 黄海中央断裂带, F7. 南黄海西缘断裂带, F8. 苏州-湖州断裂, F9. 江绍断裂, F10. 苏北滨海断裂。

Fig.1 Schematic diagram of the distribution of regional deep fracture and active faults in offshore China^[2-3]

F1. Tanlu Fault Zone, F2. Littoral Fault Zone, F3. Wulian-Qingdao-Rongcheng Fault, F4. Jiashan-Xiangshui-Qianliyan Fault, F5. Zibo-Wulian-Rizhao Fault, F6. South Yellow Sea Central Fault Zone, F7. South Yellow Sea West Marginal Fault Zone, F8. Suzhou-Huzhou Fault, F9. Jiangshao Fault, F10. Subei Littoral Fault.

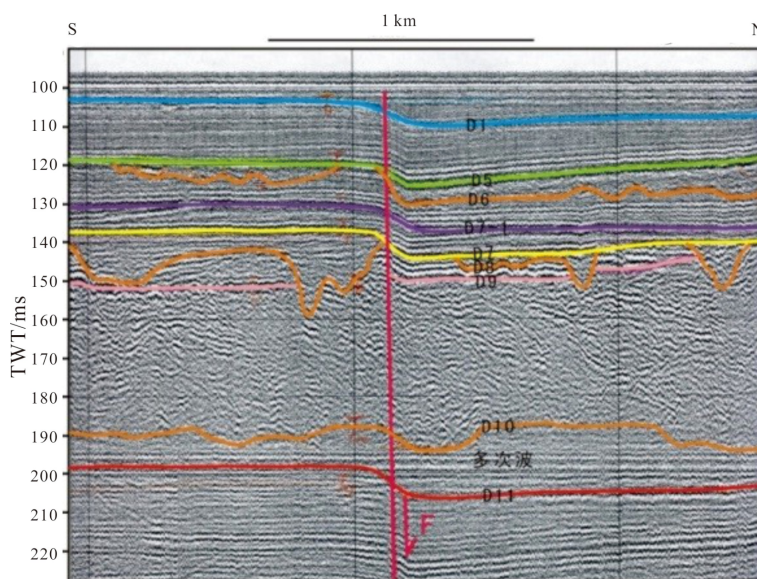


图 2 南黄海典型的浅部地层声学剖面

Fig.2 A typical sub-bottom profile in the South Yellow Sea

裂向深部的延伸情况。

1.1.2 单道地震探测

单道地震基本原理是利用机械方法引起海底以下中、浅部地层震动,利用专业仪器按照一定的观测方式,记录震源震动后的中、浅部地层中各反射点原始振动信息,再经过一定数据处理得到成像剖面,最后推断解释海底中浅部地层结构和构造特征^[14]。

单道地震采集系统主要由控制与记录系统(工作站)、震源、电缆接收系统及导航定位系统组成。震源主要为大功率、高频电火花震源和小容量相干气枪震源(如 GI 枪);电缆接收主要采用 48 个等间距排列的水听器组成的单道接收单元。常规的单道地震采集系统采用 1 个激发震源、1 个单元接收水听器的“一发一收”模式,它具有探测深度较大的优点,但由于水听器的排列间距较大,其探测分辨率较低,对地层的分辨能力在 5 m 左右。最新发展的“一发双收”双通道采集模式,即 1 个震源激发地震波,2 条接收水听器电缆同时接收反射波信号(其中一条为常规接收水听器电缆,另一条为小间距的 20 个水听器组成的接收单元)。由于小间距水听器接收单元对高频地震波的组合压制效应弱,对浅部地层分辨率较高,但对于干扰波的压制能力较差,对埋藏深度较大的地层探测能力不足。因此,“一发双收”的双通道采集模式,可以同步获得 2 道地震反射记录,达到对浅部地层高分辨率探测和大深度探测的有机结合^[15]。

由于采用了气枪和大功率电火花震源,激发的

地震波主频率一般为 200~500 Hz,较浅地层剖面探测的震源主频有较大的降低,但探测深度得到了提高,一般可探测深度在 1000 m 以内的地层,对浅部地层的探测分辨率为 0.5~3 m,对深部地层的分辨率为 5~6 m。因此,单道地震探测可以研究浅部断裂向深部的延伸及与深大断裂的耦合情况,但对断距小于分辨率的断裂难以识别。

1.1.3 高分辨率短排列多道地震勘探

虽然浅地层剖面、单道地震探测具有拖曳电缆短、施工快捷高效、数据处理简便、分辨率高等优点,但由于其为单道接收的垂直入射/反射地震信号,缺失偏移距信息而无法进行速度分析,也不能进行基于多次叠加的信噪比提升和成像处理,多次波压制和噪音剔除处理难度大,数据的信噪比低等问题突出。另外,新构造研究的目标之一是查明是否存在活动的构造断裂,也就是要寻找构造断层,并非第四纪沉积断层或海底滑坡,这就要求地震探测不仅对浅部地层有较高的分辨率,而且要对沉积基底(即第四系—新近系的底界)清晰成像^[16]。中国近海有较大部分区域的沉积基底埋藏深度达 1500 m 以上,勘探深度更大并且对沉积基底成像更精确的高分辨率多道地震调查方法,成为沉积基底埋藏深度大的区域活动断裂调查的主要勘探方法。

早期的高分辨率多道地震探测是在油气地震勘探基础上发展、改造而成的,一般采用 25 m 或 12.5 m 道间距的 24 道/48 道地震电缆,为了提高勘探分辨率,电缆的沉放深度较小,一般小于 3 m,同时采用小容量、浅沉放的气枪震源,勘探深度在

2 000 m 左右, 满足了对沉积基底埋藏深度大的地区活动断裂调查的需求^[16-17], 但由于常规海洋地震勘探电缆的道间距大, 地震勘探的横向分辨率较低。

为了在保持勘探深度的同时提高探测分辨率, 自然资源部第一海洋研究所等在“863”计划的支持下, 研制了由震源激发系统、地震信号接收系统和导航定位系统组成的近海高分辨率多道地震拖缆勘探系统。其中, 震源系统配置大能量、高频电火花震源或 GI 型气枪震源; 地震信号接收系统配备 3.25 m 道间距的 24 道等浮接收电缆(可扩充到 48 道或 96 道), 每道由两个或多个水听器组成, 多个检波器组合主要是利用干扰波与有效波特征及差异与视速度差异在资料采集阶段压制某些干扰波^[18], 道间距的大幅度缩小带来了更高的横向探测分辨率, 有力地保障了勘探精度。采集的地震资料的成像处理结果表明, 该系统能够有效探测到基岩的起伏, 且疏松沉积层的分辨率高(图 3)。

海上采集的高分辨率多道地震资料经过精细成像处理后才能用于构造与地层解释。因此, 地震资料成像处理是高分辨率多道地震勘探的重要环节之一, 也是提高资料分辨率和信噪比的有效途径^[19]。主要采用 SRME 浅水多次波压制技术^[20]、线性干扰压制的 TAUP 变换方法^[21]、压制虚反射的抛物线 Radon 变换方法^[22]等噪音压制技术方法。由于高分辨率短排列多道地震的原始资料特点, 其成像处理的技术难度较大, 主要是这种地震采集方式的接收排列短(通常小于 500 m), 提供速度分析所需的旅行时差信息较少, 造成精细速度分析精度差, 采用基于相似性原理的排列长度放大技术, 有效地解决了排列长度较短引起的速度谱能量团不

聚焦、影响速度分析灵敏度的问题^[23]。

中国浅海区以油气勘探为目标采集了大量的长排列高分辨率地震资料。在渤海海域将高分辨率地震资料中的近偏移距地震道数据, 在采取常规处理方法的同时, 采用地震相分析、波阻抗反演、井震标定、属性分析等特殊处理技术, 提高了成像处理剖面分辨率, 预测了活动断裂分布, 形成了一套利用高分辨率地震资料预测海底及浅层地质灾害的技术方法^[24], 为活动断裂的地震探测提供了新的技术思路。

1.2 长排列多道地震探测

海洋拖缆多道地震勘探是海洋油气资源和区域地质调查的重要手段之一, 目前已形成了较为成熟的资料采集、处理和解释的技术方法。海洋拖缆多道地震勘探以专业的地震调查船为载体, 将仪器设备安装在地震船上, 使用海上专用的压电检波器和电缆, 激发系统多使用气枪阵列, 由地震船牵引拖缆按测线方向行进, 形成边行进、边激发、边接收的工作方式。现今的海洋多道地震勘探具有以下特点^[11]: (1)震源容量大、能量强, 多采用多支容量不等的气枪组成的大容量气枪阵列(总容量为 3 000~6 000 in³ 甚至更高)作为激发地震波震源, 结合立体阵列延迟激发等新技术方法^[8,25-26], 其低频能量强, 穿透能力可达 10 000 m 以上; (2)电缆长、接收道数多, 一般以 12.5 m 的道间距, 记录地震波反射的道数在 480 道以上, 电缆长度达 6 000 m 以上; (3)采用多次覆盖的采集方式, 覆盖次数达 100 次以上, 成像剖面信噪比较高; (4)探测深度大, 可获得埋藏深度 10 000 m 左右沉积盆地基底的有效反

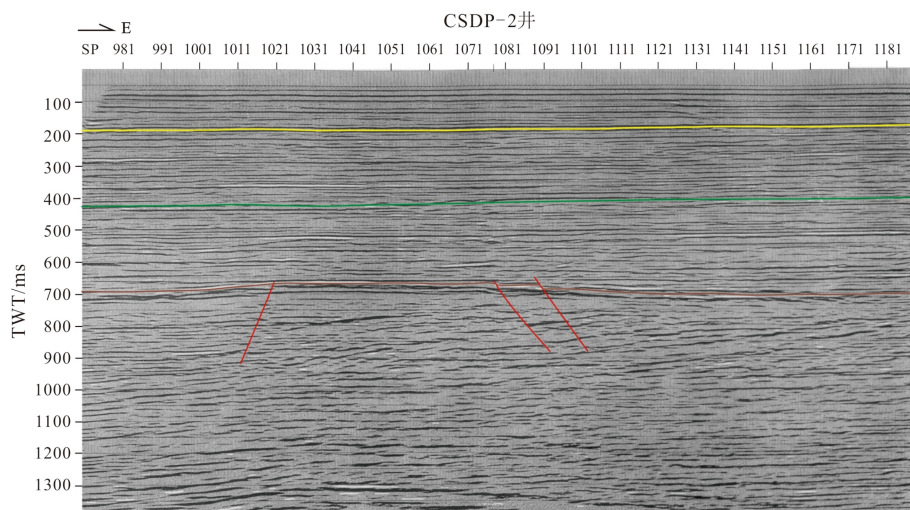


图 3 过 CSDP-2 井典型的高分辨率多道地震剖面

Fig.3 A typical high resolution multichannel seismic section through well CSDP-2

射; (5) 分辨率较低, 由于大容量气枪阵列震源激发特性的限制, 激发地震波的主频一般只有 20~30 Hz, 有效频带为 6~80 Hz, 对勘探目标分辨能力较低, 属于中-低频地震勘探范畴。

多道拖缆地震的勘探深度大, 对探测深达盆地基底的大断裂非常有利, 在对成像剖面进行常规解释的同时, 结合高分辨率处理^[27]、地震相分析^[28]、反演^[29-30]与属性分析^[31-34]等技术方法, 可以弥补分辨率的不足, 在识别大断裂的同时预测浅部的活动断裂, 进而分析大断裂与活动断裂的耦合关系, 研究新构造运动机理。

1.3 地壳结构的地震探测方法

研究认为, 现今板块边界和运动学图像的建立是新构造运动最合适的标志^[35], 新构造研究的时间尺度较长, 重点是百万年至十万年尺度的地质构造过程, 更注重探索“过去”, 涉及构造形迹(断裂与褶皱)及其演化等领域。OBS 深部地学探测能够获得宏观地壳速度结构, 是研究板块边界、识别深大断裂的重要手段^[9,36]。

OBS 深地震探测是一种将检波器直接放置在海底的地震观测系统, 分为主动源(人工源)和被动源(天然源)两种探测方式。主动源探测首先沿测线按一定的间距(一般为 5~30 km)将 OBS 投放到海底形成接收台站, 然后沿测线用大容量气枪阵列震源等间距地激发地震波, OBS 台站接收激发的所有地震波, 形成共检波点(共接收点)记录, 它记录了从炮检距零米(垂直入射/反射波)到上百千米(甚至几百千米)的地震信号, 所以 OBS 台站记录既包含了反射波信号(包括近炮检距和远炮检距的广角反射信号), 也接收到了来自于地壳内部主要地层

界面的折射波信号; 对 OBS 台站记录的原始地震数据采用数据分析、震相辨认、射线追踪和走时模拟等处理方法, 可以获得测线下方地壳结构的二维纵波、横波速度模型^[37-38]。

被动源 OBS 探测使用宽频带 OBS, 如国产宽频带、7 通道(I-7C 型) OBS, 采用单球一体化结构, 7 通道的采集(3 通道宽带地震计(频带宽带 30 s~40 Hz)、3 通道高频检波器、1 通道水听器), 同时具备了接收人工震源信号和低频天然地震信号的能力^[9]。通过将宽频带 OBS 布设在靠近板块边界或深大断裂附近及观测海域, 记录有关地震活动性的更详细的信息, 特别是小地震的信息, 根据记录的大量与构造运动有关的微震数据, 通过采用层析成像等处理方法, 勾画出地壳-上地幔的速度结构^[39-41]。

OBS 放置在海底, 直接接收在海底地层中传播的地震信号, 可以同时记录两个水平方向上传播的地震波(横波)、一个垂直方向地震波(纵波)和一个水听器数据, 在进行纵波探测的同时, 还可以进行横波探测, 得到纵波、横波速度结构和泊松比等地层物性参数, 为研究地层岩性、识别火成岩等提供物性依据^[36,42-45], 而火成岩的分布是活动构造研究的内容之一。

因此, 在海洋地球物理调查和研究中, OBS 探测既可以用于对海洋人工地震剖面的探测, 也可以用于对天然地震的观测, 其探测和观测结果可以用于研究海洋地壳和地幔的速度结构及板块俯冲带、海沟、海槽演化的动力学特征, 也可以用于研究天然地震的形成机理以及活动性并进行地震预报等^[46]。

OBS 探测的特点是深度大, 能够得到反映地壳宏观结构的速度特征(图 4), 但其分辨率较低, 只能反映地壳范围内的宏观速度结构。

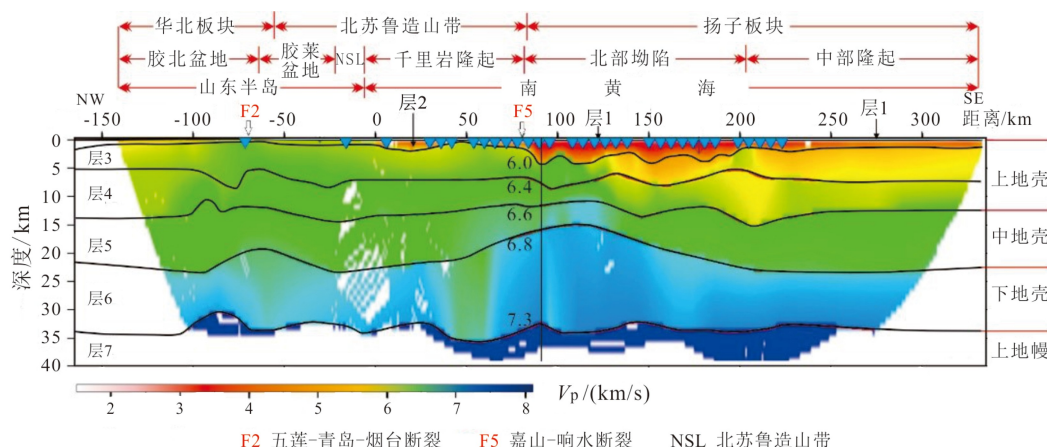


图 4 南黄海 OBS-2013 线纵波速度结构剖面^[44]

Fig. 4 P-wave velocity structure section of line OBS-2013 in the South Yellow Sea^[44]

2 应用实例

目前,地震勘探技术在中国近海新构造运动研究中取得了大量的成果。基本查明了与活动断裂有关的区域性深大断裂(图1)和第四纪仍在活动的浅层断裂。通过使用二维及三维高分辨率多道地震剖面,结合层序地层学分析等解释方法,认识到渤海海域在郯庐断裂带形成的走滑拉张环境下,浅层断层向下逐渐归拢至深大断裂,断至海底后形成所谓的“通天”断层^[24],在更新世末又发育一次区域挤压产生的褶皱,多道地震剖面上也可见到界面上下明显的角度不整合和大量密集的张扭性断层^[47],造成渤海盆地浅层断裂十分发育,主体构造线呈NE、NNE或近EW向展布,这些也得到高分辨率单道地震测网成果的支持^[48];营口-潍坊断裂的晚期活动对渤海浅层断裂系统的发育具有重要的控制作用,新近纪基底的断裂数量大约是古近纪基底断裂的3~4倍,而第四纪基底又是新近纪基底断裂数量的2倍^[49]。通过对二维多道地震剖面的目标解释,也得到了南黄海盆地西北部与深大断裂相关的第四纪活动断裂的分布,揭示了NW-SE挤压型活动断裂的存在,并伴随着“背驮式”扩展型构造,说明其还在持续活动^[50]。

如前所述,浅地层剖面探测、单道地震和高分辨率多道地震方法是研究活动断裂的主要工具,在中国近海活动断裂探测中发挥了重要作用。利用浅地层剖面仪对郯庐断裂带莱州湾段进行了活动断裂探测,发现第四纪晚期以来郯庐断裂带主干断裂仍在活动,并继承了新近纪以来的主要构造活动特点,仍是这一区域的主导性构造^[51]。在渤海采用水枪震源单道地震方法获得了垂向穿透深度约300~500 m、垂向分辨率约2~3 m的地震剖面,同时采用电火花震源单道地震方法,还获得了垂向穿透50~80 m、垂向分辨率约0.5~1 m的地震剖面,在此基础上研究了渤海海域郯庐断裂段晚更新世以来的分布和活动特征,认为莱州湾和渤海海域郯庐断裂的最新活动时间为全新世早期,形成了褶皱和倾向相同或相反的更次一级张性断裂,辽东湾内最新活动时间为晚更新世晚期,形成了倾向相同或相反的更次一级断裂,这些和地震活动有明显的对应关系^[6,52]。另外,浅地层剖面探测揭示,郯庐断裂带的次级断裂是1969年的渤海7.4级地震的发震断裂,其最新活动时间为全新世中晚期,根据地质时代以及断层的垂向位移量计算推断,晚更新世

—全新世具有活动强度增加的趋势^[6]。

随着渤海海峡跨海通道设想的提出,该区域的新构造运动特征成为研究的热点。研究者采用了常规多道地震和高分辨率单道地震的探测方法,探测了渤海海峡的活动断裂等新构造运动特征^[52],认识到渤海海峡活动断裂发育,主要发育NE、NW、SN和EW向四组断裂系统,NE向断裂和NW向断裂为占绝对优势的断裂系统(图5)。其中,NNE向郯庐断裂是渤海海域中最重要的断裂带,最新活动时代为全新世早期,晚更新世—全新世各个时段的垂向活动速率超过0.06 mm/a,近20 kaBP的垂向活动速率超过0.08 mm/a^[53];张家口-蓬莱-威海NW向断裂晚第四纪以来主要表现为垂向运动,最新活动时代为晚更新世末—全新世,在60 kaBP和20 kaBP左右活动强烈,近20 kaBP以来的垂向活动速率超过0.06 mm/a^[6];五莲-青岛-海州NEE及近EW向断裂为华北块体与苏胶临津江造山带的分界断裂,该断裂在青岛-荣成段的切割深度较浅,在海域被黄海中央断裂带阻断^[54]。

南黄海北部海域的千里岩断裂是一条区域性深大断裂,也是南黄海北部盆地与千里岩隆起的分界断裂,其活动性备受关注。浅地层探测剖面、单道地震显示千里岩断裂在晚更新世仍在活动^[55],多道地震剖面显示其主要受深大断裂控制(图6),活动段长度大于100 km,具有发生约6.5级地震的可能性,在地震预报和地震危险性分析中值得进一步研究。高分辨率单道地震剖面显示千里岩附近海域是千里岩隆起区构造较活跃地区,第四纪构造变形较显著,形成较多的褶皱和断层构造,千里岩断裂和嘉山-响水断裂带在第四纪以来均有活动,其中千里岩断裂活动时代较新,属于晚更新世活动断层^[56]。覆盖整个千里岩隆起带的高分辨率多道地震显示千里岩隆起带发育3条NE走向的第四纪活动断裂,最新活动时间为早更新世—晚更新世^[57]。

东海陆架盆地是中国东部海域典型的中、新生代断拗二元盆地,上新世晚期以来的新构造运动活跃,主要表现形式有断裂、褶皱、地震及岩浆的侵入与喷发,高分辨率多道地震和单道地震揭示了多条活动断裂(图7)和两个岩浆活动密集区,截止时间为中新世—全新世,整体西带沿东海陆架西部至浙、闽、粤近海呈NE-NNE向、近EW向及NW-NNW向展布^[58-59]。东海陆架区新构造运动呈现从中新世到第四纪沉降中心自西向东迁移,活动断裂新构造期的活动性自西向东逐渐变新,岩浆活动自西向东逐渐变新、侵入活动逐渐减弱、喷发活动逐渐增强^[59],

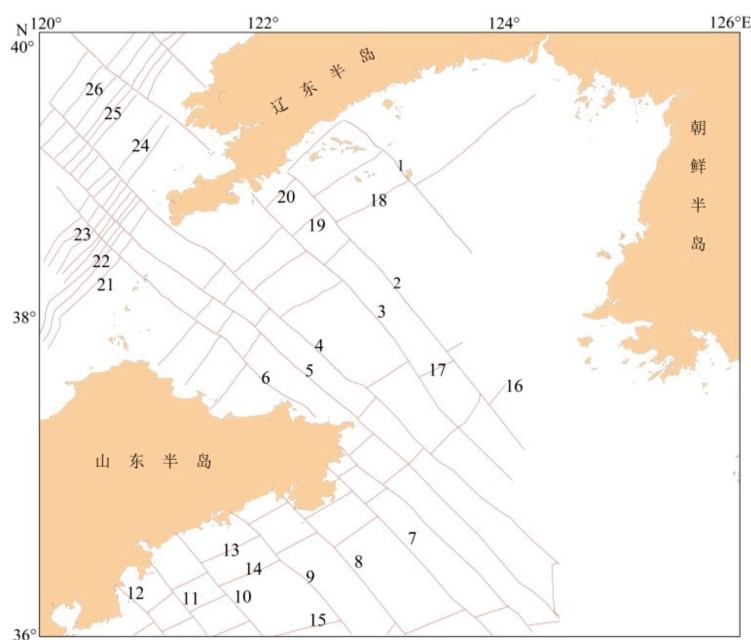


图 5 渤海海峡调查区断裂分布示意图

NW 向断裂: 1. 碧流河断裂, 2. 长兴岛断裂, 3. 大连湾断裂, 4. 旅顺断裂, 5. 老铁山水道断裂, 6. 钦岛断裂, 7. 桑沟湾断裂, 8. 靖海湾断裂, 9. 浪暖口断裂, 10. 老龙头断裂, 11. 田横岛断裂, 12. 鳌山湾断裂; NE 及 NEE 向断裂: 13. 千里岩西部断裂, 14. 千里岩东部断裂, 15. 沙子口断裂, 16. 荣成隆起南断裂, 17. 荣成隆起北断裂, 18. 四十里湾断裂, 19. 套子湾断裂, 20. 蓬莱湾断裂, 21. 庙岛陆坡断裂, 22. 庙岛集束断裂, 23. 渤中底劈断裂, 24. 辽东湾中央东断裂, 25. 辽东湾中央断裂, 26. 辽东湾中央西断裂。

Fig.5 Schematic diagram of fault distribution in the survey area of Bohai Strait

NW Fault: 1. Biliuhe fault, 2. Changxing Island fault, 3. Dalian Bay fault, 4. Lushun fault, 5. Laotieshan waterway fault, 6. Qin Island fault, 7. Sangou Bay fault, 8. Jinghai Bay fault, 9. Langnuankou fault, 10. Laolongtou fault, 11. Tianheng Island fault, 12. Aoshan Bay fault; NE and NEE fracture: 13. Qianliyan western fault, 14. Qianliyan eastern fault, 15. Shazikou fault, 16. Rongcheng uplift south fault, 17. Rongcheng uplift northern fault, 18. Sishili Bay fault, 19. Taozi Bay fault, 20. Penglai Bay fault, 21. Miaodao continental slope fault, 22. Miaodao cluster fault, 23. Bozhong bottom split fault, 24. Liaodong Bay Central East Fault, 25. Liaodong Bay Central Fault, 26. Liaodong Bay Central West Fault.

表明板块俯冲和冲绳海槽的扩张作用是造成东海陆架区新构造运动活跃的主要因素。

华南地区的近海海域主要为南海东北部, 地处欧亚板块与菲律宾海板块的交汇区, 新构造运动活跃^[60], 沿福建、广东海岸 30~50 m 海水等深线分布着一条绵延上千千米、活动强度高的 NEE 走向断裂带——滨海断裂带, 决定了南海北部大陆边缘地震的分布和强度, 在该断裂带历史上发生了多次 7 级以上的强震^[61]。因此, 对滨海断裂带的调查与研究备受关注。研究者采用 OBS 深部地学探测的方法调查研究了断裂带的地壳结构特征与震源构造, 基本查清了滨海断裂带的地质结构, 发现滨海断裂带断至莫霍面, 为华南亚板块与南海亚板块的分界断裂, 是南海东北部的重要控震和发震构造, 在上地壳下部普遍存在一层速度为 5.5~5.9 km/s、厚度为 2.5~4.0 km 的低速地层, 滨海断裂带与上地壳下部的低速地层的构造交接部位形成南海东北部的重要应力集中带和应变能积聚带, 是地震孕

育、发生的深部动力学条件^[61-63]。

3 展望

中国近海新构造运动的地震探测取得了丰富的成果, 主要集中于经济发达、地震活动强烈的近海海域, 研究主要借鉴陆域活动构造的研究方法, 成果多集中于活动性及其分布规律方面, 存在最新活动时间的厘定不精准、定量参数的研究程度较低, 浅层活动构造成因机制的研究薄弱, 海域活动构造自身因素的危险性定量评价研究欠缺等问题^[64]。针对这些问题, 地震勘探技术未来将得到较大的发展, 应用广度和深度都将进一步拓展。

(1) 多方法组合系统调查与研究是新构造运动研究的有效途径

如前所述, 不同的探测方法具有各自的优势和缺陷(表 1), 单一的方法难以达到准确描述构造特征的目的。因此, 聚焦浅层活动构造成因机制的研

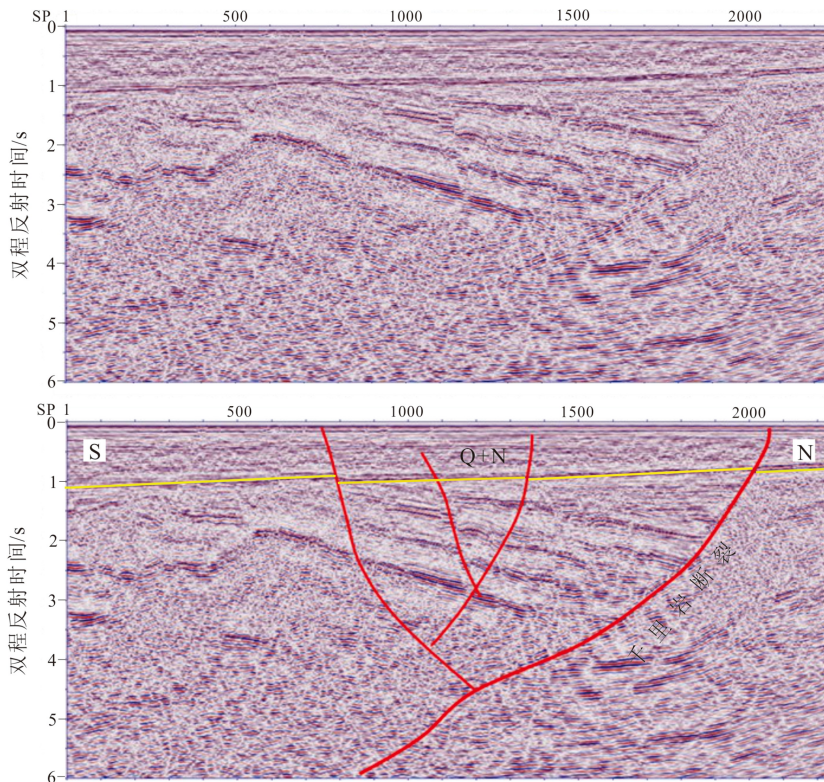


图6 多道地震呈现的千里岩断裂活动特征
上: 成像剖面, 下: 解释剖面。

Fig.6 The active characteristics of Qianliyan fault showed by multichannel seismic section
up: imaging section, down: interpreted section.

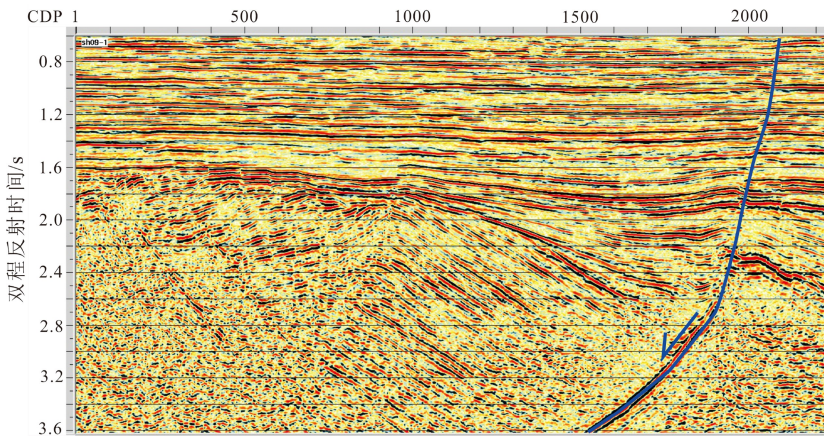


图7 东海陆架盆地多道地震显示继承深大断裂的活动断层

Fig.7 Active faults inheriting deep faults show by multichannel seismic section in East China Sea Shelf Basin

究目标, 未来将联合采用浅地层剖面、单道地震和高分辨率多道地震, 大容量气枪阵列震源、长排列多道地震及 OBS 深部探测的技术方法, 综合利用不同探测方式的分辨率和探测深度优势, 系统地调查研究地壳的浅、中、深部地质结构, 第四纪沉积环境的变迁, 活动断裂最新活动时间、强度及其与深大断裂的耦合关系, 为研究活动构造成因机制提供系统而全面的地震勘探资料。

(2) 提高地震勘探的精度是研究新构造运动的有效途径

新构造运动最新活动时间的精准厘定, 需要在地震剖面上准确地标定活动断裂顶部的终止层位, 要求地震剖面的分辨率达到厘米级甚至更高, 目前分辨率最高的浅地层剖面探测分辨能力在 50 cm 左右, 还不能完全满足活动时间的精准厘定的要求, 未来还要继续开发更高分辨率、更高导航精度的浅

表 1 主要地震勘探方法对比
Table 1 Comparison of main seismic exploration methods

探测方法	分辨率	勘探深度	工作方式	主要用途
浅地层剖面	20~50 cm	100 m左右	电火花震源激发, 拖曳式单道接收	用于全新世地质特征和活动断裂探查
单道地震	2~5 m (和震源的激发能量有关)	500~1000 m (和震源的激发能量有关)	电火花震源或小容量气枪激发, 拖曳式单道接收	用于第四纪地质特征和活动断裂探查与成岩基底相关的活动断裂探查
高分辨率多道地震	1~3 m	1000~1500 m	大能量电火花或相干气枪激发, 小间距多道接收	用于新生代地质特征和活动断裂探查与成岩基底相关的活动断裂探查
长排列多道地震	几十米到几百米	几千米到上万米	大能量气枪阵列震源激发, 长排列多道接收, 道数可达几百道	用于区域地质和探查盆地基底
海底地震仪 (OBS)	分辨率低, 只反映地层宏观速度结构	可达莫霍面	大能量气枪阵列激发, 单点独立式接收	用于探查地壳构造、深部断裂和到中到深大断裂

部地震探测技术, 以得到更高勘探精度的地震资料, 满足对活动断裂和地层岩性、沉积等精确厘定的需要。

(3)横波地震勘探技术是研究新构造的有益探索

众所周知, 地层的横波速度低于纵波速度, 陆地的勘探实践证明, 浅部疏松地层的横波速度大致相当于纵波速度的一半左右^[65]。因此, 在相同的地震波频带范围内, 横波地震勘探分辨率高于纵波地震勘探, 是提高勘探分辨率的一个新途径。但是, 在海洋地震勘探中, 由于横波不能在海中传播, 以海水为接收介质的地震勘探方法(如拖缆多道地震、单道地震和浅地层剖面探测)难以得到横波信号。因此, 在海域里实施高分辨率横波地震勘探, 还面临震源和检波器等设备的瓶颈问题, 海洋高分辨率横波地震探测装备的研发和勘探技术的攻关, 将成为未来努力的方向之一。在目前已有的装备条件下, 采用 OBC^[66]、OBN^[67] 和 OBS 等海底接收地震信号的勘探方法, 接收地震转换波达到横波勘探的目的。另外, 利用最新发展的海底可控震源激发地震波技术^[68], 通过在海底激发地震波和提高振动器的主频率, 实现对激发地震波频带的有效控制, 提高转换横波的分辨率, 以提高达到有效利用横波优势的目的。

参考文献 (References)

- [1] 郭玉贵, 王红霞, 邓志辉, 等. 山东沿海及近海地震分形分析[J]. *地球物理学进展*, 2005, 20(1): 155-159. [GUO Yugui, WANG Hongxia, DENG Zhihui, et al. The fractal analysis on seism in the coastal and Offshore areas of Shandong province [J]. *Progress in Geophysics*, 2005, 20(1): 155-159.]
- [2] 曹敬贺, 孙金龙, 徐辉龙, 等. 珠江口海域滨海断裂带的地震学特征[J]. *地球物理学报*, 2014, 57(2): 498-508. [CAO Jinghe, SUN Jinlong, XU Huilong, et al. Seismological features of the littoral fault zone in the Pearl River Estuary [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2014, 57(2): 498-508.]
- [3] 李旭东, 刘绍文, 王丽. 江苏—南黄海地区地震活动时空分布特征及其孕震构造分析[J]. *高校地质学报*, 2018, 24(4): 551-562. [LI Xundong, LIU Shaowen, WANG Li. Spatiotemporal pattern of earthquake activities and seismotectonics in Jiangsu and adjacent southern Yellow Sea Area [J]. *Geological Journal of China Universities*, 2018, 24(4): 551-562.]
- [4] 吴中海. 活断层的术语、研究进展及问题思考[J]. *地球科学与环境学报*, 2018, 40(6): 706-726. [WU Zhonghai. Active faults: Terminology, research advance, and thinking on some problems [J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 2018, 40(6): 706-726.]
- [5] 王志才, 邓起东, 晁洪太, 等. 山东半岛北部近海海域北西向蓬莱-威海断裂带的声波探测[J]. *地球物理学报*, 2006, 49(4): 1092-1101. [WANG Zhicai, DENG Qidong, CHAO Hongtai, et al. Shallow-depth sonic reflection profiling studies on the active Penglai-Weihai Fault zone offshore of the Northern Shandong Peninsula [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2006, 49(4): 1092-1101.]
- [6] 李西双, 裴彦良, 刘保华, 等. 1969年渤海MS7.4地震震源层的声学探测[J]. *地球物理学报*, 2009, 52(9): 2291-2301. [LI Xishuang, PEI Yanliang, LIU Baohua, et al. Acoustic detection of the causative fault of 1969 MS7.4 earthquake in Bohai Sea [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2009, 52(9): 2291-2301.]
- [7] 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 Kai, HOU Fanghui, LI Rihui, et al. Using single-channel seismics for active faults investigation in Yellow Sea and Bohai Sea [J]. *Marine Geology Frontiers*, 2012, 28(8): 27-30.]
- [8] 吴志强, 肖国林, 林年添, 等. 基于南黄海区域地质调查的地震关键技术和成果[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2014, 34(6): 119-126. [WU Zhiqiang, XIAO Guolin, LIN Niantian, et al. The key seismic technology and results based on the regional geological survey of the South Yellow Sea [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2014, 34(6): 119-126.]
- [9] 郝天珧, 游庆瑜. 国产海底地震仪研制现状及其在海底结构探测中的应用[J]. *地球物理学报*, 2011, 54(12): 3352-3361. [HAO Tianyao, YOU Qingyu. Progress of homemade OBS and its application on ocean bottom structure survey [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2011, 54(12): 3352-3361.]
- [10] 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 Baohua, DING Jisheng, PEI Yanliang, et al. Marine geophysical survey techniques and their applications to offshore engineering [J]. *Advances in Marine Science*, 2005, 23(3): 374-384.]
- [11] 张训华, 赵铁虎. 海洋地质调查技术[M]. 北京: 海洋出版社, 2017. [ZHANG Xunhua, ZHAO Tiehu. *Survey Technologies of Marine Geology*[M]. Beijing: China Ocean Press, 2017.]
- [12] Marsset T, Marsset B, Thomas Y, et al. Very high resolution 3D seismic: a new imaging tool for sub-bottom profiling [J]. *Comptes Rendus Geoscience*, 2002, 334(6): 403-408.
- [13] Chiocci F L, Cattaneo A, Urgeles R. Seafloor mapping for geohazard assessment: state of the art [J]. *Marine Geophysical Research*, 2011, 32(1): 1-11.
- [14] Petersen C J, Bünz S, Hustoft S, et al. High-resolution P-Cable 3D seismic imaging of gas chimney structures in gas hydrated sediments of an Arctic sediment drift [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2010, 27(9): 1981-1994.
- [15] 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 Hongxian, YANG Yuan, ZHANG Xiaobo, et al. Data acquisition technique for high resolution single-channel seismic survey [J]. *Marine Geology Frontiers*, 2012, 28(12): 70-74.]
- [16] 王舒畋. 浅层物探技术在近海灾害地质与工程地质调查中的应用[J]. *海洋石油*, 2008, 28(1): 6-12. [Wang Shutian. Application of shallow bed geophysical exploration technique to offshore hazard geology and engineering geology [J]. *Offshore Oil*, 2008, 28(1): 6-12.]
- [17] 杨文达, 刘望军. 海洋高分辨率地震技术在浅部地质勘探中的运用[J]. *海洋石油*, 2007, 27(2): 18-25. [YANG Wenda, LIU Wangjun. Marine high-resolution seismic techniques applying in the geological exploration of shallow strata [J]. *Offshore Oil*, 2007, 27(2): 18-25.]
- [18] 裴彦良, 赵月霞, 刘保华, 等. 近海高分辨率多道地震拖缆系统及其在海洋工程中的应用[J]. *地球物理学进展*, 2010, 25(1): 331-336. [PEI Yanliang, ZHAO Yuexia, LIU Baohua, et al. The offshore high-resolution multi-channel seismic streamer and its application to the ocean engineering [J]. *Progress in Geophysics*, 2010, 25(1): 331-336.]
- [19] 孟庆生, 楚贤峰, 郭秀军, 等. 高分辨率数据处理技术在近海工程地震勘探中的应用[J]. *地球物理学进展*, 2007, 22(3): 1006-1010. [MENG Qingsheng, CHU Xianfeng, GUO Xiujun, et al. The application of high resolution seismic data processing technique in multi-channel shallow offshore engineering seismic surveys [J]. *Progress in Geophysics*, 2007, 22(3): 1006-1010.]
- [20] Verschuur D J, Berkhout A J. Estimation of multiple scattering by iterative inversion, Part II: Practical aspects and examples [J]. *Geophysics*, 1997, 62(5): 1596-1611.
- [21] Trad D O, Urych T J, Sacchi M D. Accurate interpolation with high-resolution time-variant Radon transforms [J]. *Geophysics*, 2002, 67(2): 644-656.
- [22] Abbad B, Ursin B, Porsani M J. A fast, modified parabolic Radon transform [J]. *Geophysics*, 2011, 76(1): V11-V24.
- [23] 骆迪, 蔡峰, 吴志强, 等. 海洋短排列高分辨率多道地震高精度成像关键技术[J]. *地球物理学报*, 2019, 62(2): 730-742. [LUO Di, CAI Feng, WU Zhiqiang, et al. The key technologies of marine small scale high resolution multichannel seismic high-precision imaging [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2019, 62(2): 730-742.]
- [24] 王海平, 李春雷, 焦叙明, 等. 海底及浅层地质灾害的高分辨率地震预测技术[J]. *工程地球物理学报*, 2016, 13(6): 694-700. [WANG Haiping, LI Chunlei, JIAO Xuming, et al. High-resolution seismic prediction technology of seafloor and shallow geohazards [J]. *Chinese Journal of Engineering Geophysics*, 2016, 13(6): 694-700.]
- [25] 吴志强, 郝天珧, 张训华, 等. 扬子块体与华北块体在海区的接触关系: 来自上下源、长排列多道地震剖面的新认识[J]. *地球物理学报*, 2015, 58(5): 1692-1705. [WU Zhiqiang, HAO Tianyao, ZHANG Xunhua, et al. Contact relationships between the North China block and the Yangtze block: new constraints from upper/lower-source and long spread multi-channel seismic profiles [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2015, 58(5): 1692-1705.]
- [26] 吴志强, 郝天珧, 唐松华, 等. 立体气枪阵列延迟激发震源特性及在浅海区OBS探测中的应用[J]. *地球物理学报*, 2016, 59(7): 2573-2586. [WU Zhiqiang, HAO Tianyao, TANG Songhua, et al. Tridimensional air-gun array with delay fired source signal characteristics and the application in OBS exploration in shallow sea [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2016, 59(7): 2573-2586.]
- [27] Aleman A, Heimbach J, Medina E, et al. Broadband processing for Campeche Basin: Improved seismic resolution and attribute derivation[C]//2017 SEG International Exposition and Annual Meeting. Houston, Texas: SEG, 2017: 4881-4886.
- [28] Lee G S, Kim D C, Yoo D G, et al. Stratigraphy of late Quaternary deposits using high resolution seismic profile in the southeastern Yellow Sea [J]. *Quaternary International*, 2014, 344: 109-124.
- [29] Gray S H. Seismic imaging and inversion: what are we doing, how are we doing, and where are we going?[C]//2014 SEG Annual Meeting. Denver, Colorado, USA: SEG, 2014: 4416-4420.
- [30] Lu S M, McMechan G A. Elastic impedance inversion of multichannel seismic data from unconsolidated sediments containing gas hydrate and free gas [J]. *Geophysics*, 2004, 69(1): 164-179.
- [31] Chen Q, Sidney S. Seismic attribute technology for reservoir forecasting and monitoring [J]. *The Leading Edge*, 1997, 16(5): 445-456.
- [32] 王开燕, 徐清彦, 张桂芳, 等. 地震属性分析技术综述[J]. *地球物理学进展*, 2013, 28(2): 815-823. [WANG Kaiyan, XU Qingyan, ZHANG Guifang, et al. Summary of seismic attribute analysis [J]. *Progress in Geophysics*, 2013, 28(2): 815-823.]
- [33] 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 Weina, ZHANG Xunhua, WU Zhiqiang, 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.]
- [34] 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: 4-13.

- [35] 吴中海, 张岳桥, 胡道功. 新构造、活动构造与地震地质[J]. *地质通报*, 2014, 33(4): 391-402. [WU Zhonghai, ZHANG Yueqiao, HU Daogong. Neotectonics, active tectonics and earthquake geology [J]. *Geological Bulletin of China*, 2014, 33(4): 391-402.]
- [36] 阮爱国, 李家彪, 冯占英, 等. 海底地震仪及其国内外发展现状[J]. *东海海洋*, 2004, 22(2): 19-27. [RUAN Aiguo, LI Jiabiao, FENG Zhanying, et al. Ocean bottom seismometer and its development in the world [J]. *Donghai Marine Science*, 2004, 22(2): 19-27.]
- [37] Zhao W N, Zhang X H, Meng X J, et al. S-wave velocity structures and Vp/Vs ratios beneath the South Yellow Sea from ocean bottom seismograph data [J]. *Journal of Applied Geophysics*, 2017, 139: 211-222.
- [38] 赵维娜, 张训华, 邹志辉, 等. 基于OBS数据的南黄海沉积地层速度结构特征[J]. *地球物理学报*, 2019, 62(1): 183-196. [ZHAO Weina, ZHANG Xunhua, ZOU Zhihui, et al. Velocity structure of sedimentary formation in the South Yellow Sea Basin based on OBS data [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2019, 62(1): 183-196.]
- [39] 黄忠贤, 胥颐, 郝天眺, 等. 中国东部海域岩石圈结构面波层析成像[J]. *地球物理学报*, 2009, 52(3): 653-662. [HUANG Zhongxian, XU Yi, HAO Tianyao, et al. Surface wave tomography of lithospheric structure in the seas of east China [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2009, 52(3): 653-662.]
- [40] 秦晶晶, 袁洪克, 何银娟, 等. 层析成像技术在城市活断层探测中的应用[J]. *地球物理学进展*, 2018, 33(5): 2153-2158. [QIN Jingjing, YUAN Hongke, HE Yinjuan, et al. Application of tomography inversion method in detecting active fault [J]. *Progress in Geophysics*, 2018, 33(5): 2153-2158.]
- [41] 余景锋, 江为为, 郝天眺, 等. 中国东部海区及其邻域岩石层结构与地球动力学特征研究[J]. *地球物理学进展*, 2015, 30(3): 1100-1109. [YU Jingfeng, JIANG Weiwei, HAO Tiaoyao, et al. Lithosphere structure and geodynamics characteristics of China eastern seas and adjacent region [J]. *Progress in Geophysics*, 2015, 30(3): 1100-1109.]
- [42] 赵明辉, 丘学林, 夏少红, 等. 南海东北部三分量海底地震仪记录中横波的识别和分析[J]. *自然科学进展*, 2007, 17(11): 1516-1523. [ZHAO Minghui, QIU Xuelin, XIA Shaohong, et al. Identification and analysis of shear waves records by three-component OBSs in northeastern South China Sea [J]. *Progress in Natural Science*, 2007, 17(11): 1516-1523.]
- [43] 赵维娜, 张训华, 孟祥君, 等. 南黄海OBS数据转换横波分析及其地质意义[J]. *地球物理学报*, 2017, 60(4): 1479-1490. [ZHAO Weina, ZHANG Xunhua, MENG Xiangjun, et al. Analysis of converted shear-waves based on OBS data in the South Yellow Sea and its geological implications [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2017, 60(4): 1479-1490.]
- [44] Zhao M H, Qiu X L, Xia S H, et al. Seismic structure in the northeastern South China Sea: S-wave velocity and Vp/Vs ratios derived from three-component OBS data [J]. *Tectonophysics*, 2010, 480(1-4): 183-197.
- [45] Zhao W N, Wang H G, Shi H C, et al. Crustal structure from onshore-offshore wide-angle seismic data: Application to Northern Sulu Orogen and its adjacent area [J]. *Tectonophysics*, 2019, 770: 228220.
- [46] Ruan A G, Li J B, Lee C S, et al. Passive seismic experiment and ScS wave splitting in the southwestern subbasin of South China Sea [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2012, 57(25): 3381-3390.
- [47] 王应斌, 黄雷, 刘廷海. 渤海新构造运动主要特征与构造型式[J]. *中国海上油气*, 2012, 24(S1): 6-10. [WANG Yingbin, HUANG Lei, LIU Yanhai. The main characteristics and structural styles of Bohai neotectonism [J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2012, 24(S1): 6-10.]
- [48] 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 Jiangxin, HOU Fanghui, LI Rihui, et al. Neotectonics in the western and central Bohai Sea [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2018, 38(4): 83-91.]
- [49] 周斌, 邓志辉, 徐杰, 等. 渤海新构造运动及其对晚期油气成藏的影响[J]. *地球物理学进展*, 2009, 24(6): 2135-2144. [ZHOU Bin, DENG Zhihui, XU Jie, et al. Characteristics of neotectonism and their relationship with late hydrocarbon accumulation in the Bohai sea [J]. *Progress in Geophysics*, 2009, 24(6): 2135-2144.]
- [50] 吴德城, 朱晓青, 王庆良, 等. 南黄海西北部与深大断裂相关的活动断层特征[J]. *海洋地质前沿*, 2020, 36(2): 12-18. [WU Decheng, ZHU Xiaoqing, WANG Qingliang, et al. Characteristics of active faults related to deep faults in the northwestern part of the South Yellow Sea [J]. *Marine Geology Frontiers*, 2020, 36(2): 12-18.]
- [51] 王志才, 邓起东, 杜宪宋, 等. 莱州湾海域郯庐断裂带活断层探测[J]. *地震学报*, 2006, 28(5): 493-503. [WANG Zhicai, DENG Qidong, DU Xiansong, et al. Active fault survey on the Tanlu fault zone in Laizhou Bay [J]. *Acta Seismologica Sinica*, 2006, 28(5): 493-503.]
- [52] 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 Fanghui, WANG Baojun, SUN Jianwei, et al. Neotectonic movement across the Bohai Strait and its engineering geologic significance [J]. *Marine Geology Frontiers*, 2016, 32(5): 25-30.]
- [53] 李西双, 赵月霞, 刘保华, 等. 郯庐断裂带渤海段晚更新世以来的浅层构造变形和活动性[J]. *科学通报*, 2010, 55(18): 1908-1916. [LI Xishuang, ZHAO Yuexia, LIU Baohua, et al. Structural deformation and fault activity of the Tan-Lu Fault zone in the Bohai Sea since the Late Pleistocene [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2010, 55(18): 1908-1916.]
- [54] Kim H J, Kim C H, Hao T Y, et al. Crustal structure of the Gunsan Basin in the SE Yellow Sea from ocean bottom seismometer (OBS) data and its linkage to the South China Block [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2019, 180: 103881.
- [55] 王志才, 晁洪太, 杜宪宋, 等. 南黄海北部千里岩断裂活动性初探[J]. *地震地质*, 2008, 30(1): 176-186. [WANG Zhicai, CHAO Hongtai, DU Xiansong, et al. Preliminary survey on the Quaternary activities of the Qianliyan fault in the northern part of the South Yellow Sea [J]. *Seismology and Geology*, 2008, 30(1): 176-186.]
- [56] 李官保, 刘保华, 赵月霞, 等. 南黄海千里岩附近海域第四纪构造活动特征[J]. *地球科学—中国地质大学学报*, 2011, 36(6): 977-984. [LI Guanbao, LIU Baohua, ZHAO Yuexia, et al. Quaternary tectonic activity near the Qianliyan Island of Southern Yellow Sea [J]. *Earth Science-Journal of China University of Geosciences*, 2011, 36(6): 977-984.]

- [57] 沈中延, 周建平, 高金耀, 等. 南黄海北部千里岩隆起带的第四纪活动断裂[J]. *地震地质*, 2013, 31(1): 64-74. [SHEN Zhongyan, ZHOU Jianping, GAO Jinyao, et al. Quaternary faults of the Qianliyan Uplift in the northern South Yellow Sea [J]. *Seismology and Geology*, 2013, 31(1): 64-74.]
- [58] 王舒敏, 李斌. 东海新构造与新构造运动[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2010, 30(4): 141-150. [WANG Shutian, LI Bin. Neotectonic features and movement in the east China Sea [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2010, 30(4): 141-150.]
- [59] 侯方辉, 张志珣, 张训华, 等. 东海陆架盆地北部新构造运动特征[J]. *海洋地质动态*, 2010, 26(11): 1-6. [HOU Fanghui, ZHANG Zhixun, ZHANG Xunhua, et al. Neotectonic Movement of The northern East China Sea shelf basin [J]. *Marine Geology Letters*, 2010, 26(11): 1-6.]
- [60] 孙金龙, 徐辉龙, 李亚敏. 南海东北部新构造运动及其动力学机制[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2009, 29(3): 61-68. [SUN Jinlong, XUN Huilong, LI Yamin. Neotectonics in the northeastern South China Sea and its dynamic mechanism [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2009, 29(3): 61-68.]
- [61] 赵明辉, 丘学林, 夏戡原, 等. 南海东北部滨海断裂带的研究现状与展望[J]. *华南地震*, 2013, 23(1): 20-27. [ZHAO Minghui, QIU Xuelin, XIA Kanyuan, et al. The situation and prospect of the research on the Binhai fault of NE South China Sea [J]. *South China Journal of Seismology*, 2013, 23(1): 20-27.]
- [62] 赵明辉, 丘学林, 叶春明, 等. 南海东北部海陆深地震联测与滨海断裂带两侧地壳结构分析[J]. *地球物理学报*, 2004, 47(5): 845-852. [ZHAO Minghui, QIU Xuelin, YE Chunming, et al. Analysis on deep crustal structure along the onshore-offshore seismic profile across the Binhai (Littoral) Fault Zone in northeastern South China Sea [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2004, 47(5): 845-852.]
- [63] 徐辉龙, 丘学林, 赵明辉, 等. 南海东北部南澳大地震(M=7.5)震中区的地壳结构特征与震源构造[J]. *科学通报*, 2006, 51(增刊2): 83-91. [XU Huilong, QIU Xuelin, ZHAO Minghui, et al. Nanao earthquake (M=7.5) epicentral area structure characteristics of crust and the source structure in northeast of South China sea [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2006, 51(Suppl. 2): 83-91.]
- [64] 陈晓辉, 李日辉. 中国东部海域活动构造定量研究若干问题探讨[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2017, 37(3): 102-110. [CHEN Xiaohui, LI Rihui. A review on Quantitative studies of active tectonics in Eastern China Sea [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2017, 37(3): 102-110.]
- [65] 赵富有, 王世煜, 王典. 横波地震勘查技术在长春市活断层探测中的应用[J]. *地球物理学进展*, 2008, 23(1): 284-288. [ZHAO Fuyou, WANG Shiyu, WANG Dian. Application of seismic shear wave prospecting in detection of active faults in Changchun city [J]. *Progress in Geophysics*, 2008, 23(1): 284-288.]
- [66] Barr F J. Dual-sensor OBC technology [J]. *The Leading Edge*, 1997, 16(1): 45-51.
- [67] Ronen S, Rokkan A, Bouraly R, et al. Imaging shallow gas drilling hazards under three Forties oil field platforms using ocean-bottom nodes [J]. *The Leading Edge*, 2012, 31(4): 465-469.
- [68] Roy D A, Rekos R, Brideau C, et al. A marine vibrator to meet the joint industry project specification[C]//SEG Technical Program Expanded Abstracts. SEG, 2018: 97-101.