

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.

南黄海西北部与深大断裂相关的活动断层特征

吴德城¹,朱晓青^{2,3*},王庆良⁴,侯方辉^{2,3}

(1 中国石油大学(华东)地球科学与技术学院,青岛 266580;2 中国地质调查局青岛海洋地质研究所,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,青岛 266071;

4 中国地震局第二监测中心,西安 710054)

摘要:南黄海海域位于欧亚板块与太平洋板块两大板块相互作用的关键区域,新生代构造活动活跃,研究其活动断裂特征进而分析新构造运动规律对防震减灾具有重大意义。针对深大断层控制活动断层的特点,通过多道地震成像处理剖面,结合最新的钻探成果,准确标定了第四系底界地震反射层位,在此基础上解释获得了南黄海盆地西北部与深大断层相关的第四纪活动断层的分布特征。对活动断层的动力学机制分析认为,更新世以来,南黄海区域上受控于菲律宾海板块、印度洋板块与欧亚板块在该区域所营造的近 EW 向的挤压应力场,活动断层的属性与展布特征与该动力学机制具有较好的一致性。这些大地构造运动力的综合作用,对南黄海地区活动断层发育和地震活动起重要作用。

关键词:活动构造;新构造运动;多道地震;南黄海

中图分类号:P618.13

文献标识码:A

DOI:10.16028/j.1009-2722.2019.039

0 引言

中国大陆与海域地壳距今 340 Ma 以来发生的构造运动被称为“中国新构造运动”,由新构造运动所形成的地质构造形变现象为“新构造”,新构造不仅表现在地形、地貌、第四纪及古近—新近纪沉积物变形等方面,更涉及了构造应力作用和岩石圈动力学等问题^[1]。新构造运动的表现形式有现代地震活动、岩浆活动、断层活动、地层差异升降运动等,其中活动断层是新构造运动的主要标志之一^[2]。前期研究表明,位于山东省与江苏

省东部的南黄海海域,受印度洋板块、菲律宾海板块和欧亚板块共同作用的影响,新构造运动活跃、地震频发,在深大断层基础上继承与活化的活动断层发育^[2-3]。因此,查明与深大断层相关的活动断层展布和特征,对沿海城市的防震减灾意义重大。

地震勘探方法是研究海域断层分布的有效工具之一,由于活动断层错断的地层埋藏较浅,多利用浅地层剖面和单道地震的方法进行活动断层的调查与研究,侯方辉^[4]利用浅地层剖面研究了南黄海盆地的活动断层,并对其动力学机理进行了初步分析;李官保等^[3]利用单道地震剖面分析了南黄海千里岩附近海域的第四纪沉积层中的褶皱和断层构造,认为千里岩断层等部分断层最新活动至晚更新世,具有较强的区域活动性。

研究认为新构造运动的发生通常与老构造运动具有一定的继承性,其中地震活动明显受活动断层尤其是活动的深大断层控制^[5]。浅地层剖面和单道地震的探测分辨率高,可探测到断距微小的断层,但由于探测深度有限,难以判断浅部断层和深大断层的关系。多道地震震源能量大、接收

收稿日期:2019-02-27

资助项目:国家自然科学基金(41210005,41806048);青岛海洋科学与技术试点国家实验室鳌山科技创新计划(2015ASKJ03);国家海洋地质专项(DD20190365)

作者简介:吴德城(1995—),男,在读硕士,主要从事海洋地质研究工作.E-mail:wdch1234567@163.com

* 通讯作者:朱晓青(1982—),男,博士,主要从事海洋地质与构造地质研究工作.E-mail:XQ_Zhu0819@gmail.com

道数多,探测深度可达数千米,能够较清晰地反映深大断层的展布特征。

近年来,随着海洋地质调查工作的进行,在南黄海海域开展了新一轮的多道地震勘探工作,获得了大量的多道地震数据,对此进行处理得到了叠前时间偏移成像剖面,清晰地反映了南黄海海域深大断层的展布特征^[5]。本文以南黄海西北部为研究区,使用近年来获得的多道地震成像剖面,采用了井-震联合标定的方法,准确地标定了第四系底界的地震反射层位,根据地震波几何形态、振幅、频率、相位、连续性等特征,解释并识别了与深大断层相关的活动断层特征及其展布,并对其动

力学机制进行了初步解释。

1 区域地质背景

在区域大地构造背景上,南黄海是太平洋板块和欧亚板块相互作用的关键区域,南黄海盆地位于下扬子块体的主体部位,北以千里岩断裂为界,南至江绍断裂,是奠基于前震旦纪变质岩基底之上,“南北分带、东西分块”的大型多旋回叠合盆地(图 1a)。基于中—新生代构造和沉积地层分布特征,将南黄海盆地从北至南分为北部拗陷、中部隆起、南部拗陷和勿南沙隆起 4 个构造单元^[6]。

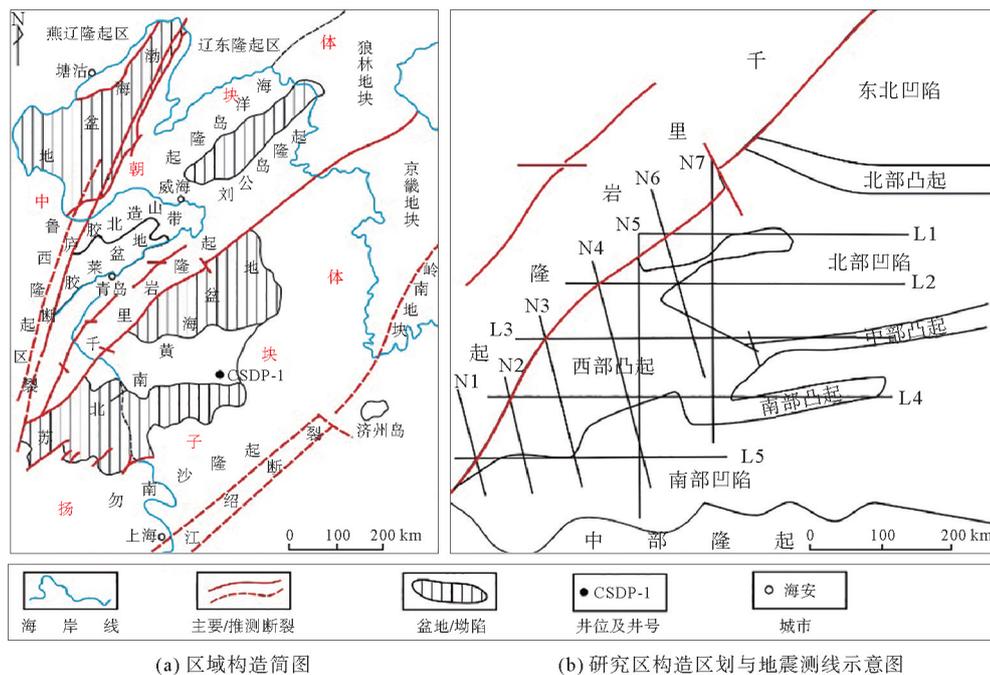


图 1 南黄海盆地大地构造示意图(据文献[6]改编)

Fig.1 Schematic tectonic map of the South Yellow Sea Basin (modified from reference [6])

本文研究区位于南黄海海域西北部,为北部拗陷的主体部位(图 1b),整体位于扬子块体上。北部拗陷北界为千里岩断裂,邻近扬子块体和中朝块体的交界地带,是南黄海盆地最北部、最大的次级构造单元,其南北界的断裂皆为深大断裂^[7]。千里岩隆起由胶东群及粉子山群变质岩系组成,是一个长期裸露的基底隆起区。新生代时期,千里岩隆起的南部超覆了 300~500 m 的晚新近纪及第四纪沉积^[8]。历史地震研究与现代地震监测结果表明,千里岩附近海域是南黄海北部地震活

动较为活跃的地区,至今有多次 4 级以上地震发生^[9]。在该区域已发现的活动断层证据,也证明了其具有较强的构造活动性^[3]。

最新的地震勘探成果表明,北部拗陷南界以断层与中部隆起相隔,属于中—新生代断陷盆地^[10]。地球物理与钻探资料表明,北部拗陷的中—新生代陆相沉积层厚度大,已被钻探揭示的地层有侏罗系、白垩系、古近系、新近系和第四系,在靠近千里岩断裂区域,古近纪断陷沉积层厚度可达 6 000 m 以上,中—新生代陆相沉积层厚度

累计超过 8 000 m。在中—新生代陆相沉积盆地的基底之下,发育了分布广、厚度大的海相残留盆地,推测主要的残余地层为寒武—二叠系^[11]。北部拗陷的形成、演化与晚白垩世以来多期构造运动有关^[11-12],这些构造运动控制了拗陷的构造格局和断层与沉积层展布。

2 多道地震对比解释

2.1 数据来源与精度

本次的地震资料的解释是以断层组合研究为主的构造解释,采用的资料为基于油气勘探和区域地质调查目标取得的多道地震资料。其主要采集技术参数为:海洋大容量气枪震源(气枪容量达 5 000 in³ 以上)+拖缆多道地震,炮间距 37.5 m,接收电缆(排列)长度 4 000~8 000 m,记录道数介于 480~600 道,道间距 12.5 m,覆盖次数为 60~160 次,数据记录长度 8 s^[13]。

对取得的原始地震资料采用了噪音剔除、多次波组合压制、精细速度分析和叠前时间偏移成像等处理技术,最终得到的成像剖面信噪比较高、振幅较强,连续性较好,整体结构清晰、深大断层特征突出,勘探深度可达万米以上,能够真实地反映地质结构和特征^[13-15]。但是,这些地震剖面的成像处理重点在中—深部目标层,对浅部反射波组的成像关注度较低,造成浅部反射波组的分辨率较低,主频只有 30 Hz,按地震波分辨率的理论计

算,其极限分辨率约为 15 m,远低于单道地震和浅地层剖面的分辨率。

2.2 解释标定

准确地标定第四系底界的地震反射层位是新构造运动研究地震资料解释的必要条件,对地震波组的准确标定主要依靠岩心和测井资料。在 CSDP-1 孔完成之前,由于缺乏准确地第四系底界埋深的资料,难以准确厘定南黄海第四系底界的埋藏深度。根据 CSDP-1 孔准确厘定的第四系底界埋藏深度^[16-17]和第四纪地层的地震速度特征^[18],采用 1 600 m/s 的地震层速度对地震反射波组进行时间-深度转换,在地震剖面上准确地标定了代表第四系底界面的地震反射界面——T1 波组。在此基础上进行地震反射波组的对比追踪解释,分析地震相、识别断层。

由过 CSDP-1 孔的地震剖面标定结果可见,在多道地震成像处理剖面上存在着 4 个反射界面标志波组(图 2),分别为近海底反射界面(Tb)、上更新统底部反射界面(T0)、第四系底部反射界面(T1)和新近系与基底分界的反射界面(T2)。按照这 4 个反射不组的波形相似性与连续性等特征进行追踪解释。

海底反射界面是海底沉积层与海水的分界面,由于多道地震数据的地震波主频较低(一般只有 20~30 Hz),受直达波的干扰和处理中初至波切除的影响,在多道地震剖面难以准确拾取海底反射波。因此,剖面上第 1 个波组 Tb 位于实际的海

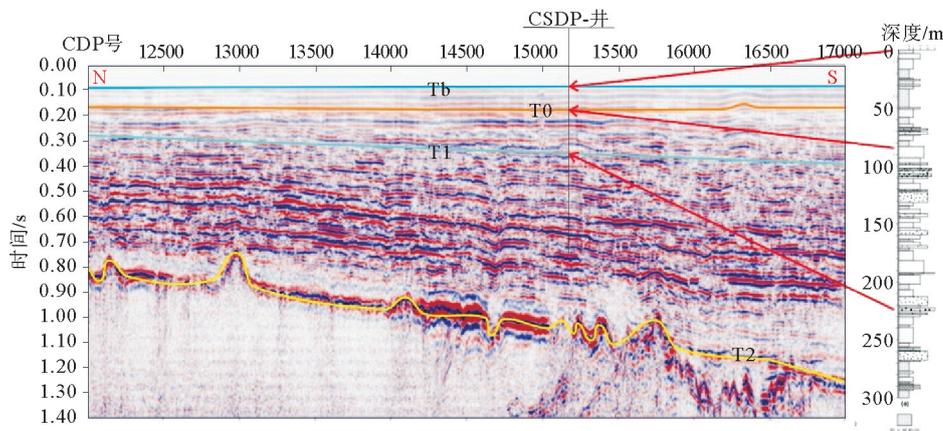


图 2 过 CSDP-1 孔 EW 向多道地震测线剖面层位标定图

Fig.2 East-west multi-channel seismic profile passing through CSDP-1 hole

底反射界面之下,一般与其平行,故称为近海底反射界面,主要呈现强振幅、中—低频率、连续性好的特征,其界面的起伏形态代表了海底地形的变化。

在 Tb 波之下第 3 个反射相位对应的反射界面为上更新统的底界,定义为 T0 反射界面(波),海底之下的埋藏深度大约为 50~60 m,呈现了平行、近平行反射和强振幅、低频率、连续性好的特征,反映了以砂质沉积物为主,中间夹泥质沉积物的沉积组合。

T1 反射界面代表了第四系底界反射,为海相沉积与陆相沉积的分界面,界面之上的第四系以海相沉积为主,界面之下的新近系以陆相沉积为主。在中部隆起上,“大陆架科学钻探”项目最新取的 CSDP-1 孔、CSDP-2 井岩心样品磁性地层学测试分析成果认为,该界面在海底之下的埋藏深度为 226 m,对应的地震波反射走时为 282 ms 的界面(包括地震波在海水中的反射走时在 352 ms 左右)。该反射界面一般为中等反射振幅,中—高频率、连续性较好的反射特征,与上、下波组呈平行、近平行接触关系,可较好地连续追踪。

T2 为新近系底部反射界面,是一个区域性不整合面的地震反射波界面,也是全区可连续追踪的标志性的反射界面。界面上部为近水平、密集的反射波组,能量中等、连续性好、波形稳定,与上覆反射波组呈上超接触,与下伏反射波组呈削截接触。

3 活动断层地震反射特征

3.1 地震反射特征

研究区多发育活动断层和深大断层。深大断层是规模巨大、切割多套地层而且发育时间较长的区域性断层,这类断层一般断穿多道地震剖面上的声波基底并深入到盆地基底内部。继承深大断层的活动断层在多道地震剖面中主要呈现以下特征:断层向下部的延续深度大,均断穿 T2 地震反射界面并向深部延伸,断层两侧的几乎所有的地震波组都出现错断现象,其上部能断穿到 T0 甚至延续到 Tb 地震反射界面(图 3、4)。但是,有些深大断层呈现了非活动断层的特征,如图 4 所示的千里岩断层只断至 T2 地震反射界面,而其南部的深大断层向上断穿了 T0 地震反射界面并延伸至 Tb,下部断穿盆地基底。

3.2 活动断层特征

本次识别的活动断层均为深大断层的基础上继承发展的断层,这类断层在研究区内表现形式多种多样,区域上以正断层为主,逆断层为辅。如图 4 所示的正断层,其上部断至海底,下部断穿陆相盆地基底,一般为控制凸起和凹陷的分界断层,该类断层一般表现为较直立的断层,下部断距大,倾角也略有增大,上部断距小,倾角也小,说明该

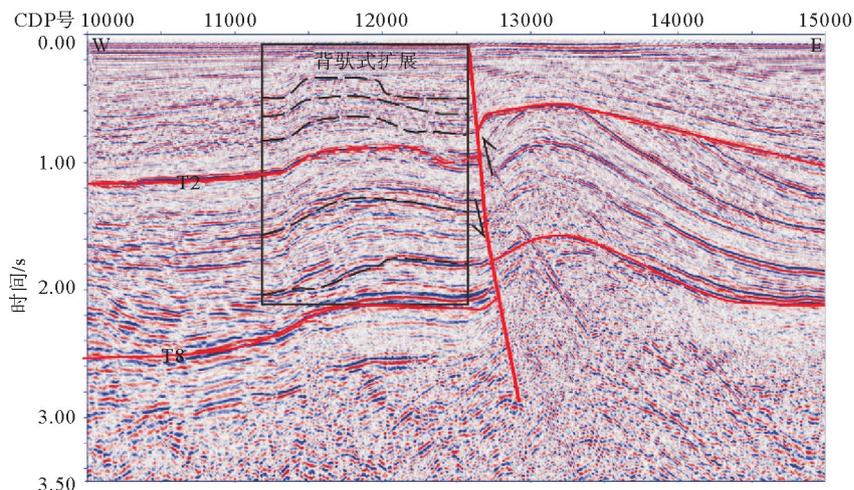


图 3 N4 线显示的“通天断底”逆断层

Fig.3 The reverse fault shown on the N4 line

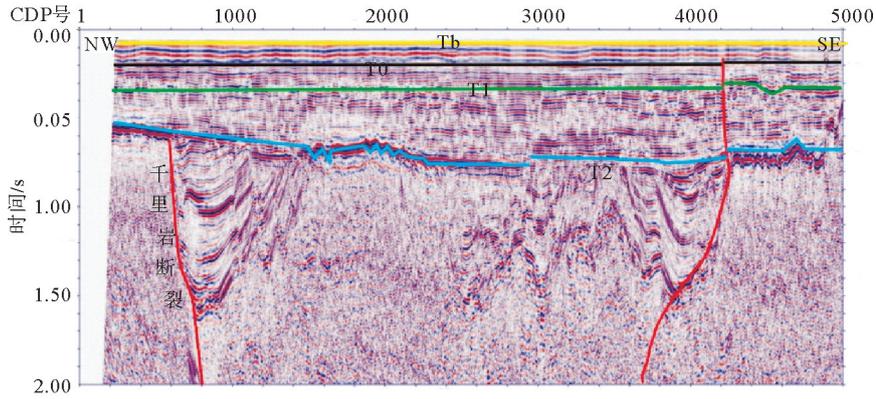


图4 N1线地震反射剖面的活动断层特征

Fig.4 Active fault characteristics of seismic reflection along the N1 line

类断层是在深大断层基础上自第四纪以来活化的生长断层。

另一类断层为标志挤压应力环境的“通天断底”的逆断层(图3),即该断层向上断至海底,向下断至中—新生代陆相盆地基底,在该断层西部可见典型的“背驮式”逆冲推覆构造扩展,其在上更新统底界可明显看到向上拱起,海底地层也存在变形隆起的迹象,显示该类构造的挤压作用还在持续进行。

在研究区也发育少量以花状构造为标志的走滑型断层。正花状构造反映了压扭应力场的动力学环境,负花状构造则对应张扭应力场。南黄海区域部分剖面上发现了切至第四系甚至海底面的花状构造(图5),断层从下部的正断层转换为上部的逆断层,可能是应力环境由拉张变为挤压,为典型的正反转构造。

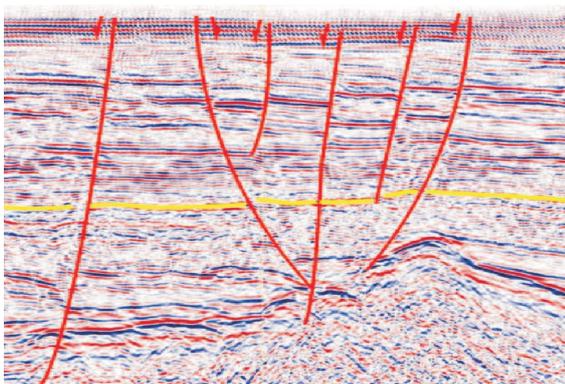


图5 负花状构造

Fig.5 Negative flower structure

3.3 活动断层的展布特征

对地震剖面上识别的活动断层位置,按照错断层位相同、断层性质一致的原则,进行了平面组合,最后形成了研究区的活动断层分布图(图6)。图中可见,研究区内分布着2条SW—NE向活动断层,这2条断层向上断穿第四系底界,逼近近海底反射界面,向下断穿陆相盆地基底,根据断层上下盘波组的双程反射时间差计算,在T0界面(全新统的基底)的断距在3m左右,在T1界面的断距在5m左右。该2条断层属正断层性质,是受到拉张作用形成的断层。在其南部还分布有2条NW—SE向断层,向上断穿海底,向下断穿陆相盆地基底。该断层受到挤压作用的影响,西部可见背驮式扩展型构造,虽然还没有形成新的逆冲

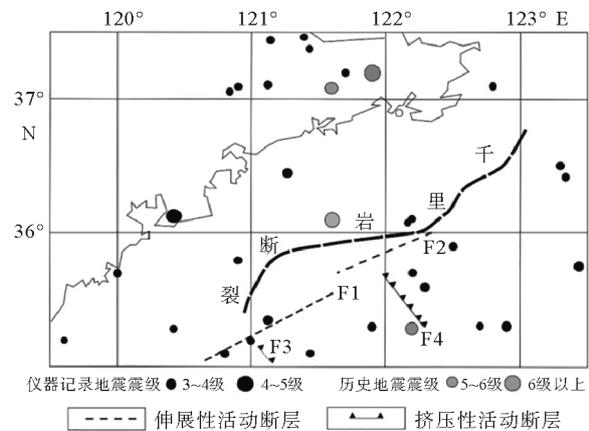


图6 活动断层展布图(地震震中位置据文献[7])

Fig.6 Spatial distribution of active faults (epicenter locations from reference[7])

断层,但该构造运动还在持续进行,海底地层也呈现出背斜的特征。

4 活动断层与潜在地震影响关系

研究区内的活动断层的活动时期持续到了中一晚更新世,区域地质研究认为该区域的构造运动以整体沉降为主,宏观上受西太平洋构造域的控制^[19]。前人的研究表明,中更新世末期的构造事件控制了研究区的新构造运动,由于印度洋板块向 NEE 方向运动,菲律宾海板块向 NW 方向运动,而研究区正处于 2 个板块运动的影响区域,2 种不同方向应力的相互作用,造成千里岩断层具有右旋走滑的特征,形成了近 EW 向挤压,近 SN 向拉张的构造格局,造成了 F1、F2 拉张型断层和 F3、F4 挤压型断层,成为了研究区的新构造运动的主要表现断层。

图 6 中展示研究区 1970 年以来的 3 级以上地震震中的位置,F1—F4 断层均位于地震震中区的中心地带,其中沿 F4 断层还发生过一次 5 级地震,说明这些断层仍在活动中,是造成现代地震的主要原因,进一步证明了北部坳陷的西北部是地震的潜在区的推测^[4]。这 4 条断层向下延伸深度大、向上均延续到了中更新统。由于这些断层在第四系中的断距较小,多道地震的分辨率较低,是否延续到海底还难以确定,需要高分辨率浅地层剖面资料的支持。

5 结论

利用南黄海近 10 年来取得多道地震叠前时间偏移成像处理成果剖面 and 钻探取心资料,运用地震地层学的原理和方法,对研究区第四纪地层结构和新构造运动特征进行了分析研究,主要取得了如下成果和结论:

(1)根据准确标定第四系底界深度的钻孔数据,采用深度-时间转换的方法,在多道地震剖面上准确地标定了第四系底界的地震反射界面 T1。

(2)通过地震资料的解释,指出了活动断层与深大断层对应关系,识别出拉张型、挤压型和走滑型等 3 类断层。其中,拉张型断层的走向是 SW—NE,在浅部呈现走滑型的特征;挤压型逆断

层呈 NW—SE 走向,相对于拉张型断层,它的延续长度较短,这些均反映了区域构造运动的方向和性质的差异。

(3)在分析断层的分布、走向和性质的基础上,结合区域构造演化特征分析,获得了活动断层的平面分布,分析了活动断层的动力学机理,认为南黄海新构造断层活动是一个新的构造变形和断裂过程,在深大断层基础上的第四纪断层的活动基本上持续到全新世,是造成现代地震的主要因素。

参考文献:

- [1] 李祥根.中国新构造运动概论[M].北京:地震出版社,2003.
- [2] 侯方辉,张志珣,李三忠,等.南黄海新构造运动[J].海洋地质动态,2005,21(11):8-10.
- [3] 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].中国地质大学学报(地球科学),2011,36(6):977-984.
- [4] 侯方辉.南黄海晚第四纪地震地层学与新构造运动研究[D].青岛:中国海洋大学,2006.
- [5] 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.
- [6] 蔡乾忠.中国东部与朝鲜大地构造单元对应划分[J].海洋地质与第四纪地质,1995,15(1):7-20.
- [7] 沈中延,周建平,高金耀,等.南黄海南部千里岩隆起带的第四纪活动断裂[J].地震地质,2013,35(1):64-74.
- [8] 陈新,毛正毅,汪福田.南黄海地质及地震[J].地震地质,1991,13(3):205-211.
- [9] 吴戈.黄海及其邻区的历史地震[J].中国地震,2004,20(3):299-305.
- [10] 李楠,李巍然,龙海燕.南黄海盆地北部坳陷正反转构造[J].海洋地质与第四纪地质,2013,33(3):95-100.
- [11] 吴德城,侯方辉.南黄海区域地质与地球物理调查进展[J].地球物理学进展,2017,32(6):2687-2696.
- [12] 姚永坚,夏斌,冯志强.南黄海古生代以来构造演化[J].石油实验地质,2005,27(2):124-128.
- [13] 吴志强,刘丽华,肖国林,等.南黄海水相残留盆地综合地球物理调查进展与启示[J].地球物理学进展,2015,30(5):1692-1705.
- [14] 吴志强,曾天玖,肖国林,等.南黄海低信噪比地震资料处理技术探索[J].物探与化探,2014,38(5):1029-1037.
- [15] 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.海洋地质与第四纪地质,2014,34(6):119-126.
- [16] Liu J X, Liu Q S, Zhang X H, etc. Magnetostratigraphy of a long Quaternary sediment core in the South Yellow Sea [J]. Quaternary Science Reviews, 2016, 144: 1-15.

- [17] Jian Liu, Xunhua Zhang, Xi Mei, etc. he sedimentary succession of the last ~3.50 Myr in the western South Yellow Sea: Paleoenvironmental and tectonic implications [J]. *Marine Geology*, 2018, 399:47-65.
- [18] 吴志强, 陈珊珊, 赵维娜, 等. 南黄海新近纪以来地层沉积特征研究的地震技术方法 [J]. *海洋地质前沿*, 2015, 31(2):63-69.
- [19] 侯方辉, 张志珣, 张训华, 等. 南黄海盆地地质演化及构造样式地震解释 [J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2008, 28(5): 61-68.

CHARACTERISTICS OF ACTIVE FAULTS RELATED TO DEEP FAULTS IN THE NORTHWESTERN PART OF THE SOUTH YELLOW SEA

WU Decheng¹, ZHU Xiaoqing^{2,3*}, WANG Qingliang⁴, HOU Fanghui^{2,3}

(1 School of Geosciences, China University of Petroleum, Qingdao 266555, China;

2 Qingdao Institute of Marine Geology, CGS, Qingdao 266071, China; 3 Laboratory for Marine Mineral Resources,

Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology(Qingdao), Qingdao 266071, China;

4 Second Crust Monitoring and Application Center, CEA, Xi'an 710054, China)

Abstract: The southern Yellow Sea is located in the area where the Eurasian and Pacific plates interact. Cenozoic tectonic activities are quite active there. It is of great significance to study the characteristics of active faults so as to understand the neotectonic movement of the region for earthquake prevention and disaster mitigation. It is believed that active faults are controlled by deep faults. In order to understand the features of the active faults, this paper accurately calibrated the bottom boundary of the Quaternary with multi-channel seismic imaging processing in addition to new drilling holes. The distribution pattern of the deep faults related active faults in the northwestern Yellow Sea Basin is described and explained. Results show that the distribution of Quaternary active faults are obviously associated with deep faults. According to the analysis of the dynamic mechanism of the active faults, the South Yellow Sea has been affected by a near EW compressive stress field since the Pleistocene, caused by the joint interaction of the Philippine Sea plate, the Indian Ocean plate and the Eurasian plate in the south. The development of active faults and related earthquakes play important roles in the Yellow Sea region.

Key words: active structure; neotectonic movement; multi-channel earthquake; South Yellow Sea