

李西双,裴彦良,刘保华等. 1969 年渤海 $M_s7.4$ 地震发震断层的声学探测. 地球物理学报, 2009, **52**(9): 2291~2301, DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2009.09.013

Li X S, Pei Y L, Liu B H, et al. Acoustic detection of the causative fault of 1969 $M_s7.4$ earthquake in Bohai Sea. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2009, **52**(9): 2291~2301, DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2009.09.013

1969 年渤海 $M_s7.4$ 地震发震断层的声学探测

李西双^{1,2}, 裴彦良^{1,2}, 刘保华^{1,2}, 赵月霞^{1,2},

刘晨光^{1,2}, 解秋红^{1,2,3}, 华清峰^{1,2}, 邓声贵³

1 海洋沉积与环境地质国家海洋局重点实验室, 国家海洋局第一海洋研究所, 青岛 266061

2 国家海洋局第一海洋研究所, 青岛 266061

3 中国海洋大学海洋地球科学学院, 青岛 266003

摘 要 发生于 1969 年的渤海 $M_s7.4$ 地震是渤海海域惟一一个主震被现代仪器记录的大地震, 对其发震断层的讨论争议颇多. 2005~2008 年, 我们在主震震区进行了 3 个航次的高分辨率声学探测, 获得了包括浅层单道地震、侧扫声纳以及 CHIRP 剖面等在内的数百公里综合地球物理观测资料. 本文报道了对上述声学资料的研究结果. 研究表明, 在震区海底之下 2~3 m 发现了一条走向 $NE30^\circ$ 、长 20 km、宽约 3 km 的微型凹陷带, 地质时代为 5000 a B. P., 沉积面的最大下凹幅度为 1.5 m; 在空间位置上微型凹陷带与 BZ28 断裂、余震活动分布基本一致, 因此, 微型凹陷带是 BZ28 断裂活动的结果, 而 A 层底界的下凹变形则是 1969 年渤海 7.4 级地震活动的结果, BZ28 断裂是该地震的发震断层. BZ28 断裂呈 $NE30^\circ$ 走向, 是郯庐断裂带的次级断裂, 浅层地震剖面揭示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, 计算得到 BZ28 断裂晚更新世以来的垂向活动速率约为 0.05 mm/a, 全新世为 0.3 mm/a, 具有活动强度增加的趋势.

关键词 1969 渤海 7.4 级地震, 发震断层, 声学探测

DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2009.09.013

中图分类号 P541

收稿日期 2009-03-30, 2009-07-28 收修定稿

Acoustic detection of the causative fault of 1969 $M_s7.4$ earthquake in Bohai Sea

LI Xi-Shuang^{1,2}, PEI Yan-Liang^{1,2}, LIU Bao-Hua^{1,2}, ZHAO Yue-Xia^{1,2}, LIU Chen-Guang^{1,2},

XIE Qiu-Hong^{1,2,3}, HUA Qing-Feng^{1,2}, DENG Sheng-Gui³

1 Key Laboratory of Marine Sedimentology and Environmental Geology, FIO, Qingdao 266061, China

2 First Institute of Oceanography, SOA, Qingdao 266061, China

3 Earth Science College, Ocean University of China, Qingdao 266003, China

Abstract The $M_s7.4$ earthquake occurred on 18 July 1969 was the only strong earthquake that has been recorded by seismometers in Bohai Sea. Now arguments about this large earthquake are focused on its causative fault. In 2005~2008, we finished three cruises in the epicenter region and collected several hundreds high-resolution acoustic surveying data, including shallow penetrated single channel data, sidescan sonar data and CHIRP data. This paper reports study results of these new acoustic data. A micro depression belt is newly found in Holocene sediments 2~3 m beneath seabed in the epicenter region and it strikes $NE30^\circ$, is 20 km long and 3 km wide. CHIRP data reveal that depositional interface formed at 5000 a B. P. has a 1.5 m vertical offset in the belt. The depression belt, BZ28 fault and aftershocks distribution of 1969 earthquake coincide

in position, so it can be assumed that the depression belt is formed by BZ28 fault and the deformation of the bottom of seismic sequence A is caused by 1969 earthquake. BZ28 fault is the causative fault of this large earthquake and it is a sub-fault in the Tan-Lu Fault Zone and strikes NE30°. Shallow penetrated single channel seismic data show that it is active during the late Holocene. According to sediments age and vertical offset, we calculate the vertical slip rate of BZ28 fault since late Pleistocene. The result shows that activity intensity of BZ28 fault has the trend of increasing from 0.05 mm/a since the late Pleistocene to 0.3 mm/a during the Holocene.

Keywords M_s 7.4 earthquake in Bohai Sea in 1969, Causative fault, Acoustic detecting

1 引言

地震活动记录显示,渤海地区是我国强震多发区,小震活动频繁.近 500 年来,渤海海域有记录的 7 级以上的地震 3 次^[1],其中 1969 年发生的 M_s 7.4 地震是目前渤海唯一一个主震具有仪器记录的大地震.鉴于环渤海人口稠密,经济发达,西岸是首都圈,对该地震做了大量的研究工作,主要集中于相关震源参数的研究^[2~8],部分涉及区域地震活动图像^[9]、破裂过程^[10]以及地震发生的构造背景研究^[11~13].由于地震发生在海域,缺少直观的地质现象,而且震后没有立即开展相应的海底调查,对发震断层的判断主要依据震源机制解、余震活动特征以及区域地质构造背景.有关 1969 年渤海 M_s 7.4 地震发震断层的归属一直存在不小的争议.一些学者认为郟庐断裂是发震断层^[11,14~17],也有一些学者认为沿黄河口—长兴岛一线存在一北东向新生断裂^[18](称之为黄河口—庙西北断裂),并认为该断裂是发震断层^[12,19,20].胡政等^[21]曾在地震附近海域开展过浅地层剖面探测,但并未指出哪一条断层的活动是最新的,未能获得有关发震断层的信息.

在土耳其南部 Marmara 海进行的一系列研究表明,高分辨率声学探测(如浅地层剖面)、侧扫声纳(探测海底地貌的声学方法)、多波束测深(一种探测海底地形的的方法)等是研究海底活断层有效的手段^[22~24].在渤海 1969 年 M_s 7.4 地震区,国家海洋局第一海洋研究所于 2005 和 2008 年先后进行了 3 个航次的高分辨率声学调查,内容包括浅层地震剖面探测、侧扫声纳测量以及 CHIRP 剖面测量(基于调频技术的高分辨率浅地层剖面探测方法)(图 1).本文对上述资料进行详细分析,结合前人的研究成果,确定了该地震的发震断层,揭示了发震断层的浅层变形特征以及晚第四纪以来的活动性.研究结果

对于认识渤海的强震带、地震区划以及地震危险性评价有较强的科学意义.

2 声学探测及资料处理

2005 和 2008 年的三个航次,共获得约 400 km 高分辨率浅层地震剖面、100 km 的侧扫声纳剖面以及 200 km 的 CHIRP 剖面.浅层地震剖面于 2005 年 9 月(使用“海监 17”调查船)和 2008 年 6 月(使用“业治铮号”调查船)获得.调查中采用“双震源双缆准同步接收技术”,即使用 S15 水枪(工作压力 1800 P. S. I.)和电火花震源(300 J)交替发射声波信号,2 条电缆分别接收不同的反射信号,同一测线上可以同时获得不同穿透深度和分辨率的浅层地震剖面.使用 DELWIN2.3 软件处理上述浅层地震资料,分辨率分别达到 0.5~1 m 和 2~3 m 左右,穿透深度分别为 50~80 m 和 300~500 m.在 2005 年 9 月的航次中,利用船载“KNUDSEN CHIRP 3200”海底剖面仪获得声波发射频率为 3.5 kHz 的浅层剖面,剖面能够揭示海底之下约 8~10 m 的全新世沉积层.为进一步了解地震的地表破裂情况,于 2008 年 7 月开展了侧扫声纳测量,调查仪器为 GeoSwath Plus 相干声纳,单侧扫幅为 100 m,利用系统自带的后处理软件处理数据.在所有的声学调查中,DGPS 定位信号实时接入声学数据文件,以保证资料位置的准确性.

3 结果与讨论

3.1 震区晚第四纪沉积地层

渤海周边及海域钻井资料的研究表明,渤海在第四纪期间曾经发生过多次海平面的升降变化,形成海侵与海退叠置的沉积层序^[25~28];近 12 万年以来,5~6 次规模较大海侵事件在渤海及周边被揭示^[27,28].浅层地震资料表明,1969 年地震区晚第四

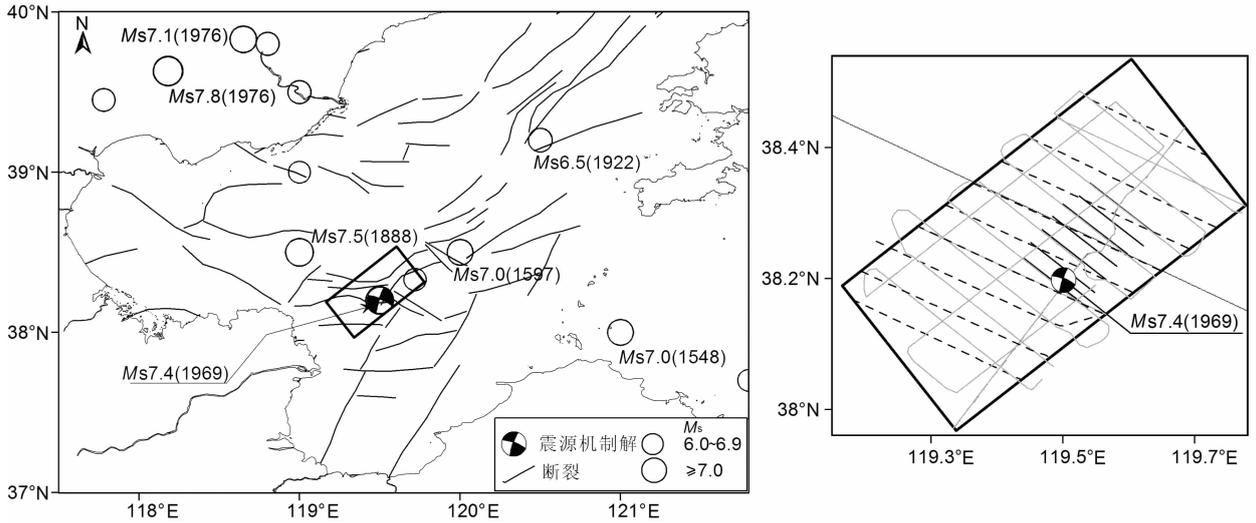


图 1 渤海新生代断裂及研究区内测线位置图

右图是左图中方框的放大. 测线位置图中黑实线为侧扫声纳航迹, 灰实线为浅层地震航迹, 黑色虚线为 CHIRP 剖面航迹; 震源机制解符号中影区为 T 轴象限.

Fig. 1 Cenozoic faults in the Bohai Sea and survey lines in the study area

Right is the zoom of the rectangle in left. In the location map, black solid lines represent sidescan sonar survey track, ashen solid lines represent shallow penetrated single channel survey track and black dashed lines represent CHIRP profiles survey track. Shadow area of focal mechanism solution symbol represents tensional quadrant.

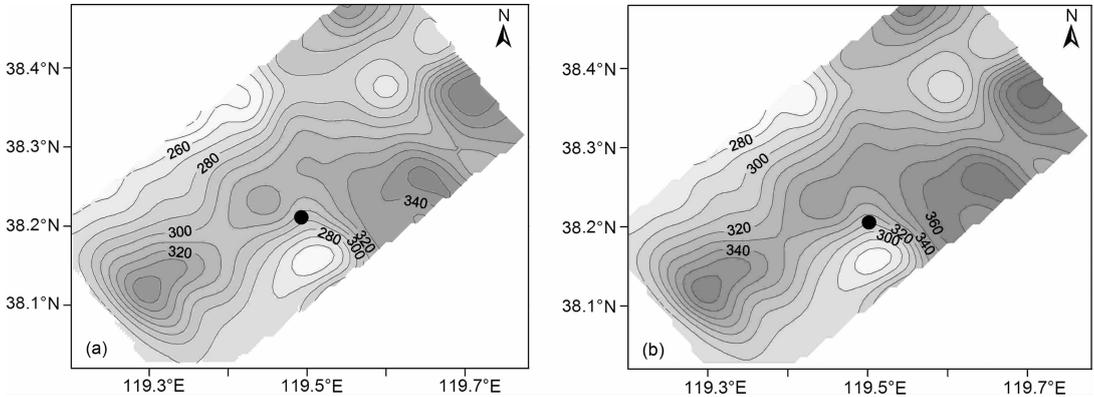


图 2 震区上更新统厚度(a)及底界埋深(b)等值线图

等值线间距为 10 m, 黑点处为 1969 年 $M_s7.4$ 级地震.

Fig. 2 Contour maps of thickness of upper Pleistocene (a) and depth of its bottom (b)

Isogram interval is 10 m. Black dots represent $M_s7.4$ earthquake in 1969.

纪沉积厚度大,晚更新统-全新统厚度在 260~350 m 范围内变化(图 2a),厚度变化趋势与晚更新统底界埋深相一致(图 2b);上第四系内浅层断裂和褶皱极其发育,特别是在早期存在的规模较大断裂位置,具有明显的断层-褶皱组合:主断裂位置发育背斜,而背斜两侧则伴生倾向相反的次生断层,背斜顶部发育张性次级断层,通常形成对称的地堑.在图 3 的单道地震剖面中,炮点 7500 处为新生代黄北断裂的位置,断层-褶皱组合显示了上述特点,而地层厚度在背斜两侧稍厚,顶部薄;而靠近炮点 5000 附近的 BZ28 断裂也显示了相似的特征.

利用 CHIRP 剖面,结合附近海域的 DB9 孔和 M9-4 孔的 ^{14}C 测年数据,对震区全新统内部的沉积结构和年代特征进行分析,以便更好地了解发震构造近期的活动性.剖面显示,震区南部全新世沉积内部具有 2~3 个主要层位,向北最上层逐渐尖灭,第二层底界强反射突然消失,整体合并为一个声学反射近透明的层位(图 3 中的 I、II、III).最上部的反射层(A 层)由岸向海方向呈楔形,应该是 1855 年黄河复回山东入海以来形成的前三三角洲沉积;第二个(B 层)和第三个(C 层)反射层呈水平,半透明状,应该为海水进入渤海以来形成的浅海相沉积. M9-4 孔

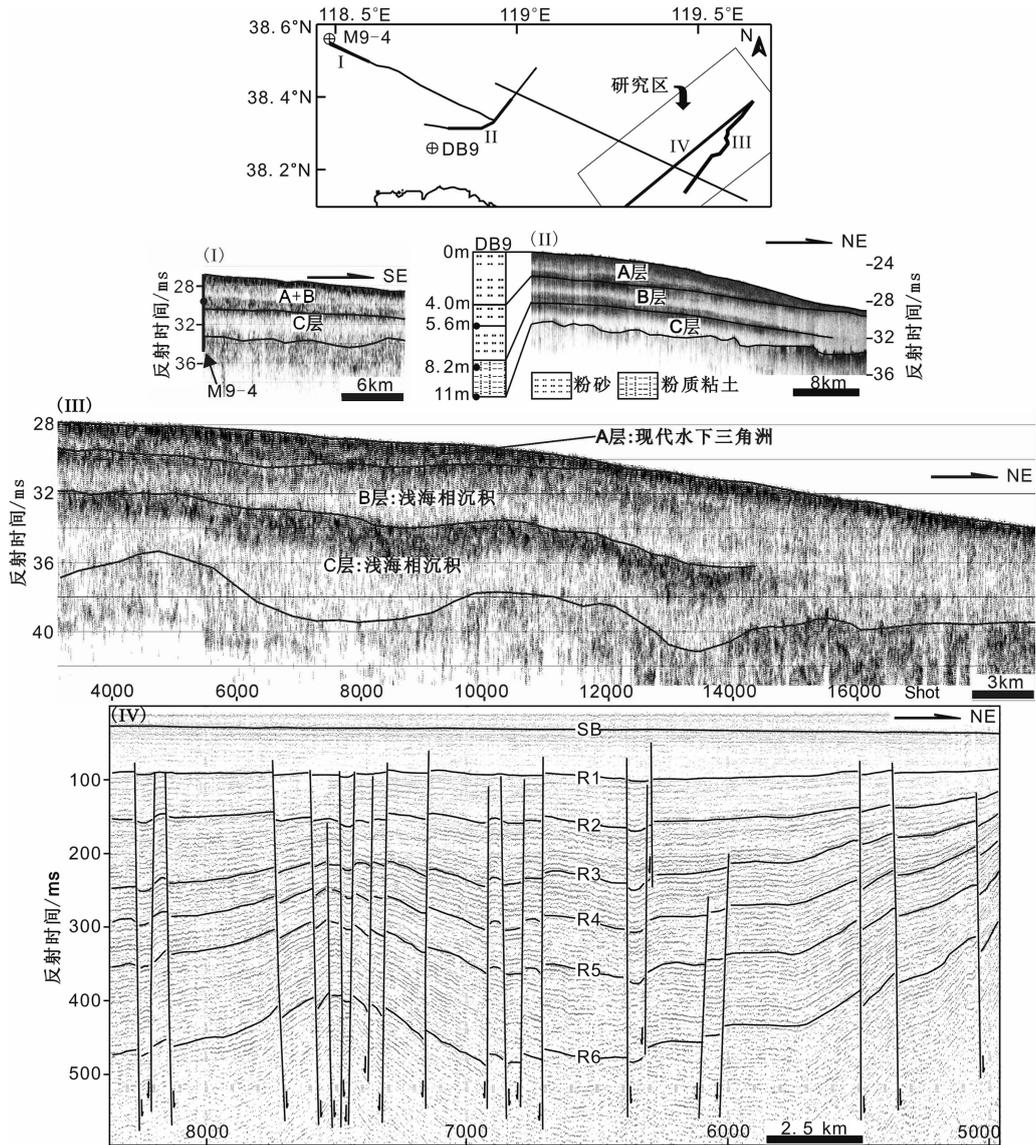


图3 CHIRP剖面及浅层地震剖面揭示的震区晚第四纪沉积

位置图中细实线为探测剖面线,粗实线为引用部分;钻孔剖面中黑点为测年位置. I,II,III为CHIRP剖面,IV为单道地震剖面(震源为S15水枪),图中A、B、C表示全新世内部自上而下的3个地层,SB表示海底,R1~R6表示上更新统内部的主要反射界面,其中R6为更新统底界,年龄为128 ka B. P.

Fig. 3 Depositional architecture since Late Pleistocene in the earthquake area

In the location map, thinner solid lines represent survey lines and thicker solid lines represent ones used below.

Black dots in holes profiles have ^{14}C dating data. I, II and III are CHIRP profiles, IV is single channel seismic profile (seismic source is water gun S15). A, B and C represent sedimentary strata since Holocene, SB represents seabed, and R1 ~ R6 represent main reflection interfaces, especially R6 (128 ka B. P.) corresponding to the bottom of the late Pleistocene.

2.2 m 靠近 B 层的底界,该位置的有孔虫 ^{14}C 年龄为 4210 ± 40 a B. P. ^[29]; DB9 孔 11.6 m 处靠近 C 层的底界,该位置的黑色沼泽泥的 ^{14}C 年龄为 8600 ± 150 a B. P. ^[30]. 上述数据表明,震区全新统上部 A 层的形成时间大致为 150 a B. P.; B 层应形成于 5000~150 a B. P. 左右, C 层应形成于 8500~5000 a B. P. 左右.

3.2 震区浅层活动构造

蔡东升等^[31]曾根据石油勘探剖面(利用地震水平切片技术)研究了渤海地区晚第三纪的构造,在参考其研究成果的基础上,利用本次获得的高分辨率浅层地震剖面,本文绘制了 1969 年震区晚更新统内的活动断层分布(图 4). 需要说明的是,由于剖面上断层密度非常大,在作图过程中并不能将所有的断

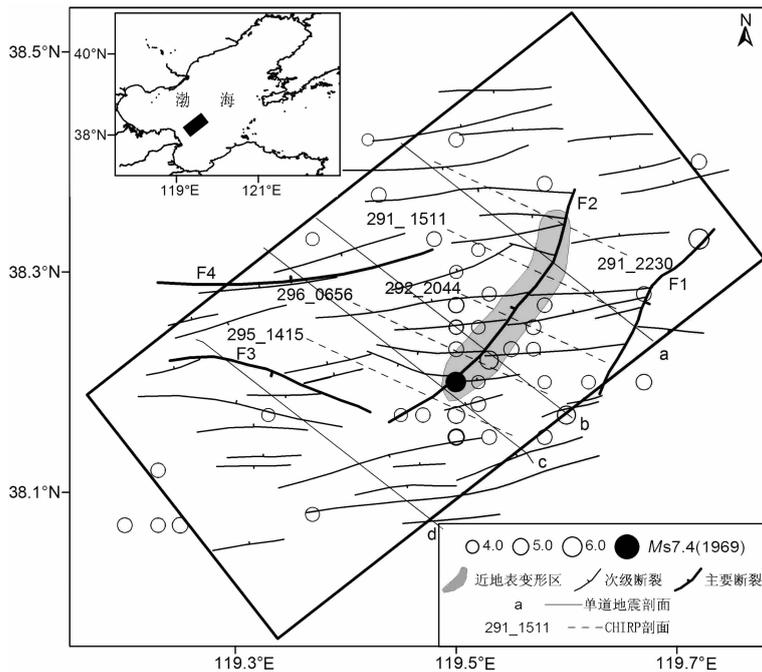


图 4 震区晚第四纪活动断层分布(地震目录由邓志辉教授提供)

图中 F1 为 BZ34 断裂, F2 为 BZ28 断裂, F3 为黄北断裂, F4 为渤南 2 号断裂;近地表变形带与 F2 断裂在位置上重合。

Fig. 4 Distribution of Late Quaternary active faults in the earthquake area
(Catalog of Earthquakes in the study area is provided by Prof. DENG Zhi-Hui)

F1: BZ34 fault, F2: BZ28 fault, F3: Huangbei fault, F4: Bonan-2 fault.

The micro depression belt and F2 fault coincide with position.

层展布在平面图上,对此,将部分断层进行简化,只将主断层绘制于平面图中.结果显示,震区内的断层走向主要为近 EW 向,其次为 NNE 向;剖面上显示区内断层为高角度的正断层,断层的最新活动时间为晚更新世晚期-全新世。

震区内有 4 条主要的新生代断裂, BZ34 断裂、BZ28 断裂、黄北断裂和渤南 2 号断裂,其中 BZ34 和 BZ28 断裂属于渤海海域内郯庐断裂带内的次级断裂^[11].在图 4 中, F1~F4 分别对应上述断裂,渤海 1969 年地震主震震中便位于 BZ28 断裂(F2)和黄北断裂(F3)的交汇处.对于上述 4 条断裂在晚第三纪-第四纪初的活动特征,吕悦军等^[32]已进行详细的探讨.本文主要讨论晚第四纪沉积物中上述断裂的构造特征。

BZ34 断裂(F1):在浅层是由多条倾向相同的次级正断层组成,断层倾向南东,倾角近直立,总体走向 NE30°.断层错动上更新统底界约 6 m,全新世地层受到微微错动,属于全新世活动断层。

BZ28 断裂(F2):由多个倾向相反的次级断层组成,形成一个 2~3 km 宽的断裂带,断裂带内沉积地层受断层牵引作用的影响而发生褶皱,背斜顶部表现为由倾向相反的正断层形成的微型地堑(图 5),

剖面上形成负花状构造;断层倾向西,倾角近直立,总体走向为 NE30°,基本和 BZ34 断裂相平行,共同构成郯庐断裂在渤海的西支部分.断层错动上更新统底界的最大位移量约为 9 m,全新统底界受到错动,亦属于全新世活动断层。

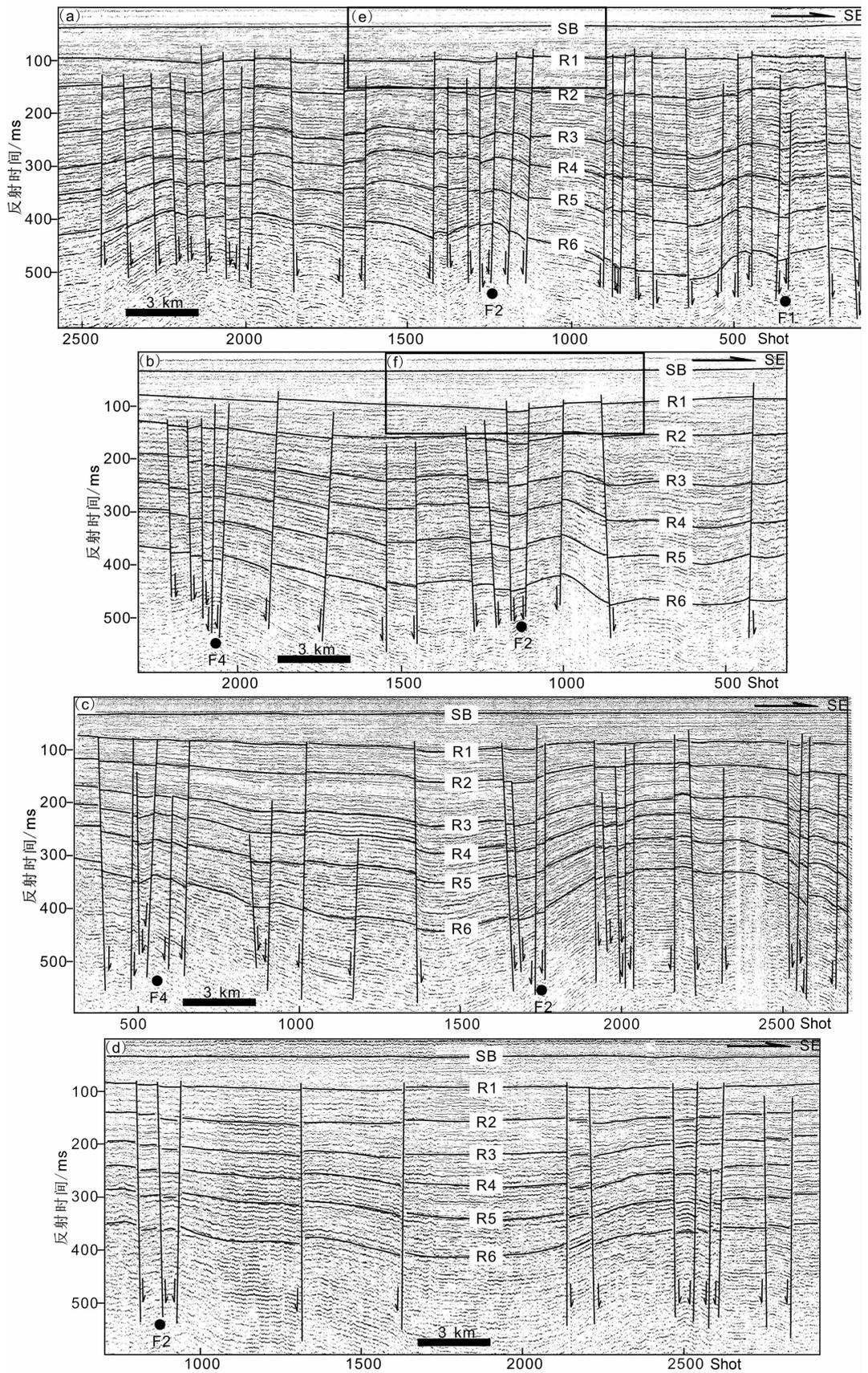
黄北断裂(F3):是黄河口凹陷北部边界断裂,晚新生代以正断作用为主^[19,32].上更新统中,该断裂有 2~3 条高角度正断层组成,总体上呈近东西走向,向南倾;剖面显示该断裂错动晚更新世晚期沉积地层,未错动全新世地层,属于晚更新世晚期活动断层。

渤南 2 号断裂(F4):由多条倾向相反的次级正断层组成,形成一个 1~2 km 宽的断裂带,断裂带内地层发生轻微褶皱;总体走向近东西,倾向北.断层错动上更新统底界约 5 m,全新世地层未受到错动,属于晚更新世晚期活动断层。

3.3 近地表变形与发震断层

尽管 1969 年渤海地震的震级达到 7 级以上,断层破裂长度被认为在 23~60 km 之间^{1)[5,19,33,34]},但

1)国家地震局震源机制研究小组.中国地震震源机制的研究. 1973



续

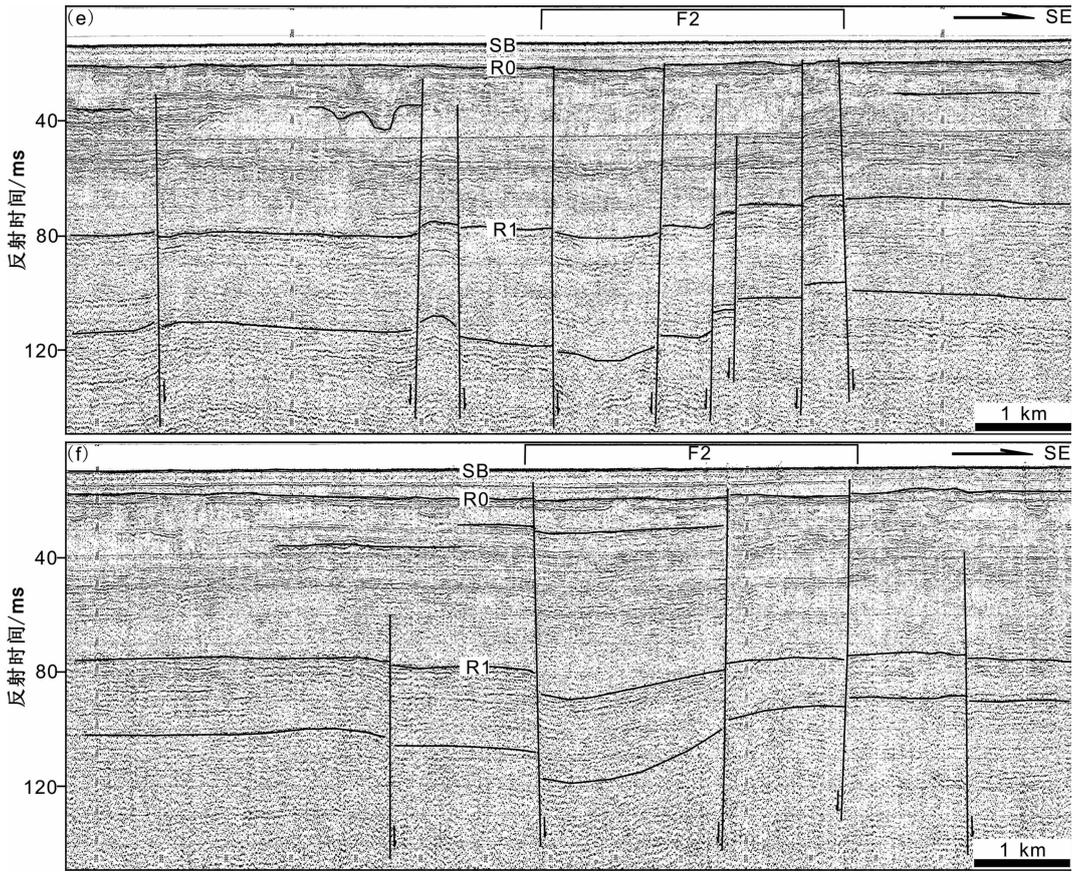


图 5 震区典型浅层地震揭示的活动断层剖面特征

(a~d)为 S15 水枪震源剖面,(e~f)为电火花震源剖面,测线位置见图 4. 反射面 R0

为现代海相沉积底界,年龄约为 8500 ka B. P.,其他反射面说明同图 3,断层名称同图 4.

Fig. 5 Cross section features of active faults revealed by shallow penetrated seismic profiles

(a, b, c) and (d) are single channel profiles collected by using water gun S15, (e) and (f) using sparker. See Fig. 4 for profiles location.

R0 corresponds to the bottom of modern marine sediments and its roughly age is 8500 ka B. P. Other reflection interface declarations are the same as in Fig. 3 and fault declarations same as in Fig. 4.

由于渤海新生代厚度巨大,震中位置第四纪沉积厚度超过 400 m^[35],沉积物对地震能量有强烈的吸收作用;同时地震位于黄河三角洲顶端海域,经过近 40 年的沉积,即使有地表破裂也已被覆盖. 本次研究获得的侧扫声纳剖面证实主震区附近海底主要表现为现代水动力地貌,并无地表破裂形成的地貌现象,如线性沟槽等(图 6). 然而,获得的 CHIRP 剖面揭示(图 7),在 1969 年地震震中位置北北东方向,海底之下 2~3 m 存在一微型带状凹陷区(图 4),将垂直于微型带状凹陷的几条剖面联系起来,可以确定微型凹陷走向 NE30°,长约 20 km,宽约 3 km. 凹陷内最大沉积层最大变形位于测线 292_1511. 根据前文对全新世内部地层时代的分析,地质年龄为 5000 a B. P. 的反射面约有 1.5 m 左右的下凹变形幅度,海底之下 1 m 附近的沉积地层(A 层底界附近)也有轻微下凹的现象(图 7);横切微型凹陷区的

地震剖面显示,微型凹陷在延伸方向和位置上均与郯庐断裂带内的次级断裂 BZ28 相一致,而该断裂的最新活动时代为全新世中晚期.

对于 1969 年渤海 $M_s7.4$ 地震发震断层的判断,前人主要是依据震源机制解和余震活动空间分布特征. 多数学者认为 NNE 向节面为地震断层面,断层表现为右旋走滑错动^[17];余震震中分布大致呈 NNE 向,与郯庐断裂带走向基本一致^[11],徐杰等^[19]则提出不同的观点. 本次研究发现的近地表微型带状凹陷位于海底之下 2~3 m,在平面上该微型凹陷带与 1969 年当年的余震震中分布^[14]较为吻合,凹陷带中 A 层底界的构造形变(年龄为 150 a B. P.)应是 1969 年地震活动的结果;微型凹陷带的长轴走向和位置与 BZ28 断裂十分吻合,表明前者是后者活动的结果;近地表的微型凹陷带、余震活动分布以及 BZ28 断裂三者之间具有高度的一致性. 因此,综

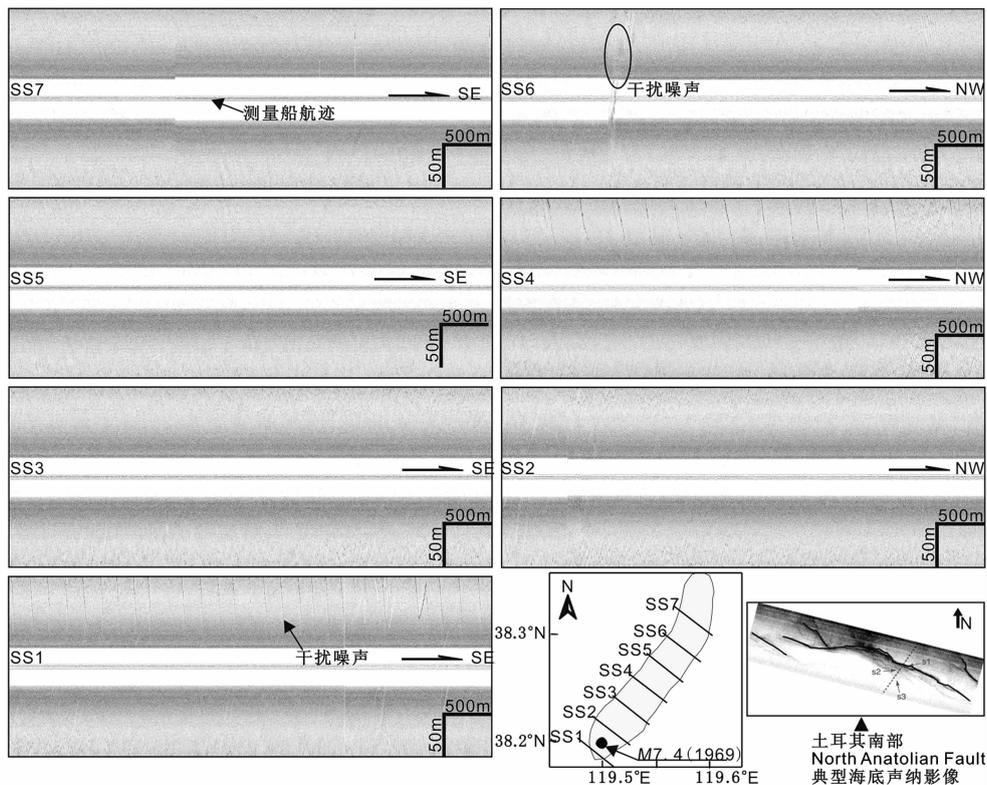


图 6 微型凹陷带处的侧扫声纳影像图

每段剖面中中心线代表了船只航迹,上下为船只两侧获得的声学影像;右下图为土耳其南部(North Anatolian)断裂海底破裂的典型侧扫声纳影像;渤海获得的声纳资料(SS1-SS7)显示震中附近海域现代海底平坦,未见1969年地震形成地表破裂地貌。

Fig. 6 Sidescan sonar images in the micro depression belt

In each profile, the center line represents ship track line and images are on both sides of the track line. The lower right image showing the surface rupture of the North Anatolian Fault under water. Flat seabed nearby the epicenter of 1969 earthquake is shown by side scan sonar images (SS1~SS7) collected in Bohai and there is no surface rupture.

合前人获得的震源机制解结果,作者认为1969年的渤海 $M_s 7.4$ 地震的发震断层是BZ28断裂,该断裂属于郯庐断裂带渤海内的次级断裂。

3.4 发震断层的活动性

已有的研究表明,晚新生代以来BZ28断裂具有右旋走滑运动性质^[36],而且1969年地震的震源机制解显示发震断裂具有右旋走滑性质,浅层剖面资料也揭示BZ28断裂具有负花状构造(图5);但在浅部地层中,正断层作用更为显著,断层面的垂向运动特征明显。CHIRP剖面显示,BZ28断裂的最新活动时间应为全新世中晚期(5000 a B. P. 的反射面有明显的变形)。通过地层的时代以及断层与地层的切割关系,可以了解断裂的垂向位移量^[37],进而计算断层垂向滑动速率。利用本次的声学剖面资料我们初步估算了BZ28断裂晚更新世以来和全新世的平均垂向运动速率。结果表明,上更新统底界(地质年代为128 ka B. P.)受BZ28断裂错动而产生的平均垂向位移量为8 m左右;全新世海相沉积层底界

(地质年代为8500 a B. P.)则有2.5 m左右的位错量,计算得到发震断裂晚更新世以来的垂向活动速率约为0.05 mm/a,全新世为0.3 mm/a。

4 结 论

(1)浅层地震剖面显示1969年 $M_s 7.4$ 地震震区晚更新世活动断层十分发育,断层走向的优势方位为近东西向和北北东向,性质以正断为主;主震震中附近的黄北断裂(F3)最新活动时间为晚更新世晚期,BZ28断裂则为全新世中晚期。

(2)侧扫声纳资料显示主震区附近海底并无地表破裂形成的地貌现象;但CHIRP剖面揭示,在主震震中附近海底之下2~3 m存在一NE走向微型带状凹陷区,长约20 km,宽约3 km;凹陷带是BZ28断裂活动的结果,而A层底界的下凹变形则是1969年 $M_s 7.4$ 地震造成的近地表变形。

(3)近地表微型带状凹陷、BZ28断裂以及余震

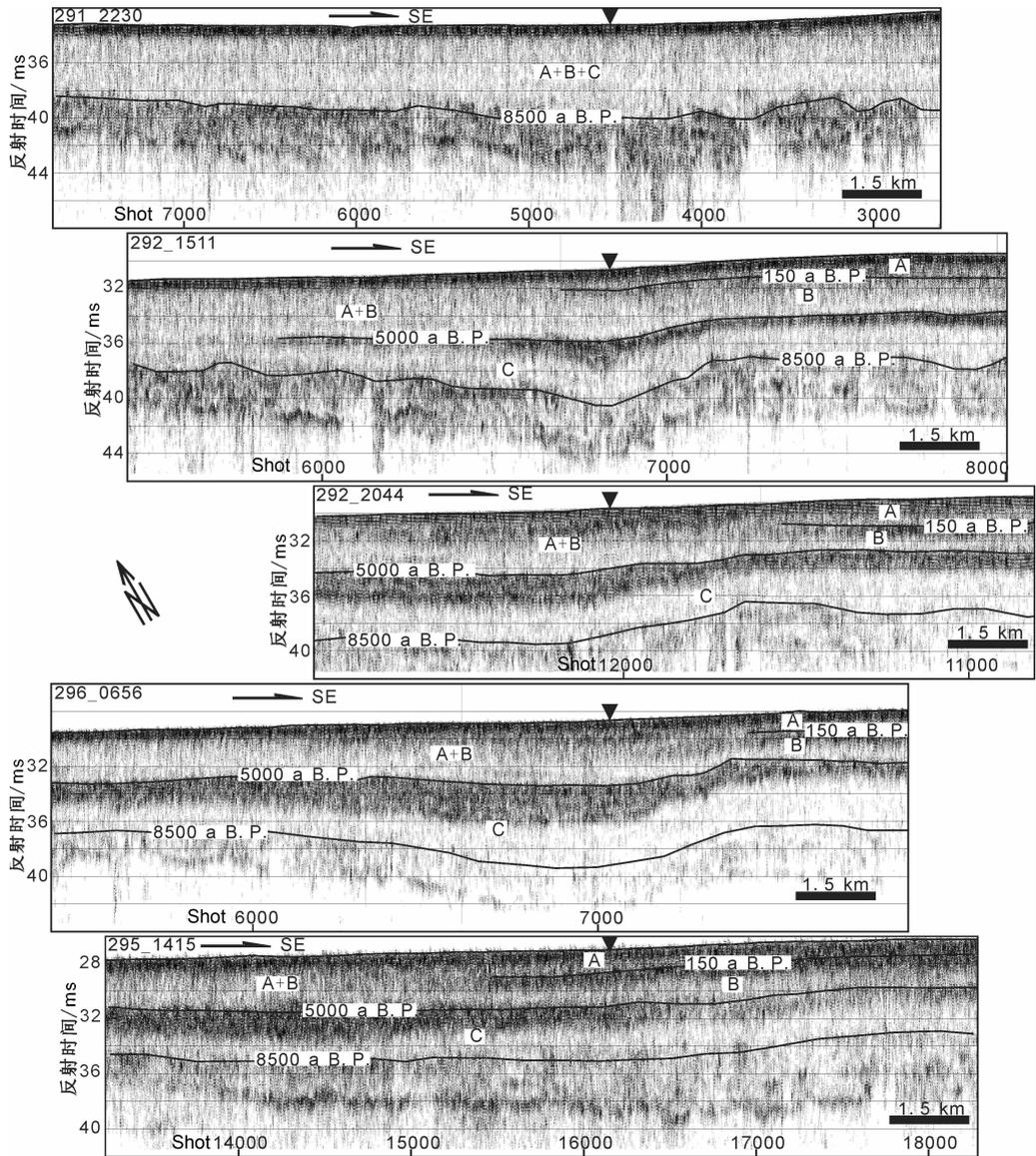


图 7 CHIRP 剖面显示 1969 年地震形成的近地表微型凹陷带

剖面位置见图 4, 倒三角为凹陷带中心, NNE 走向, 最大变形处位于 292_1511 线, 变形幅度向南北两侧逐渐减小。

Fig. 7 Micro depression belt revealed by CHIRP profiles near epicenter of $M_s7.4$ earthquake

See Fig. 4 for profiles' location. The micro depression belt (indicated by inverse triangles) strikes NE trend.

Sediments maximum deformation is shown on profile 292_1511 and decreases sideward.

活动分布在位置上具有一致性, 因此渤海 1969 年 $M_s7.4$ 地震的发震断层是 BZ28 断裂, 该断裂属于郯庐断裂带渤海内的次级断裂; 利用声学剖面资料计算出 BZ28 断裂晚更新世以来和全新世的平均垂向运动速率分别为 0.05 mm/a 和 0.3 mm/a。

致谢 感谢 3 个调查航次的全体调查队员和船员, 他们为本文使用资料的获得付出了辛勤的汗水和艰苦的努力! 感谢国家地震局地质研究所的邓志辉研究员提供了渤海地震目录, 并有幸和国家地震局地质研究所的邓起东先生、密苏里大学的 M. H. Cormier 教授对部分问题进行深入讨论。

参考文献 (References)

- [1] 顾功叙, 林庭煌, 时振梁等. 中国地震目录 (公元前 1831 年公元 1969 年). 北京: 科学技术出版社, 1983
Gu G X, Lin T H, Shi Z L, et al. Catalog of Chinese Earthquakes (from 1831 BC to 1969 AD) (in Chinese). Beijing: Chinese Science and Technique Press, 1983
- [2] 郯家全, 时振梁, 汪素云等. 中国地震及邻区现代构造应力场的区域特征. 地震学报, 1979, 1(1): 9~24
Yan J Q, Shi Z L, Wang S Y, et al. The regional characteristics of tectonic stress field in China and adjacent regions. *Acta Seismologica Sinica* (in Chinese), 1978, 1(1):

- 9~24
- [3] 束沛镛,李幼铭,铁安等.利用远震P波波形反演渤海地震的震源参数,地球物理学报,1983,26(1):31~38
Shu P Y, Li Y M, Tie A, et al. An inversion of the focus parameters of Bohai earthquake from the teleseismic P wave shape. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 1983, 26(1): 31~38
- [4] 周蕙兰,刘斌.混和波第一峰(谷)值法判断断层面和1969年渤海地震发震断层探讨——渤海地震研究(一).中国地震,1988,4(2):72~79
Zhou H L, Liu B. Assessment on earthquake-faulting from its conjugate by using firstpeak or trough of mixed P or SH-waves: Study on the Bohai earthquake (1). *Earthquake Research in China* (in Chinese), 1988, 4(2): 72~79
- [5] 卓钰如, Kannamori H. 渤海地震的震源参数.地震学报,1988,10(2):213~217
Zhuo Y R, Kannamori H. Source parameters of the Bohai Earthquake of 1969. *Acta Seismologica Sinica* (in Chinese), 1988, 10(2): 213~217
- [6] 周蕙兰,吉连祥,魏东平等.多台波形确定震源深度的 $t_{1/2min}$ 和 V_{max} 方法及1969年渤海地震初始破裂点的深度——渤海地震研究(二).中国地震,1989,5(1):32~37
Zhou H L, Ji L X, Wei D P, et al. Searching $t_{1/2min}$ and V_{max} to determine source depth by simultaneous inversion of waveforms and initial rupture depth of the 1969 Bohai earthquake—study on the Bohai earthquake (2). *Earthquake Research in China* (in Chinese), 1989, 5(1): 32~37
- [7] 吴忠良,臧绍先.用体波合成地震图方法确定渤海、永善两大地震的震源参数.地震学报,1991,13(1):1~8
Wu Z L, Zang S X. Source parameters of Bohai Earthquake of July 18, 1969 and Yongshan earthquake of May 11, 1974 from synthetic seismogram of body waves. *Acta Seismologica Sinica* (in Chinese), 1991, 13(1): 1~8
- [8] 姚殿义,杜迎春,刘素英.华北地区的震源机制.华北地震科学,1991,9(3):37~48
Yao D Y, Du Y C, Liu S Y. The focal mechanisms in North China. *North China Earthquake Sciences* (in Chinese), 1991, 9(3): 37~48
- [9] 杨港生,赵根模.1969年渤海7.4级大震前后的地震活动图像.华北地震科学,2000,18(1):39~44
Yang G S, Zhao G M. Regional seismicity patterns before and after the Bohai M7.4 earthquake of 1969. *North China Earthquake Sciences* (in Chinese), 2000, 18(1): 39~44
- [10] 陈祖安,白武明,林邦慧等.1966年以来华北地区一系列七级大震破裂过程的数值模拟.地球物理学报,2003,46(3):373~380
Chen Z A, Bai W M, Lin B H, et al. Numerical simulation for rupture processes of a series of strong earthquakes ($M_s > 7$) in North China since 1966. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2003, 46(3): 373~380
- [11] 邓起东,闵伟,晁洪太等.渤海地区新生代构造与地震活动.见:卢演涛,高维明,陈国星等主编.新构造与环境.北京:地震出版社,2001. 218~233
Deng Q D, Min W, Chao H T, et al. Cenozoic tectonics and seismicity of the Bohai area. In: Lu Y C, Gao W M, Chen G X, et al. eds. Neotectonics and Environment (in Chinese). Beijing: Seismological Press, 2001. 218~233
- [12] 陈国光,徐杰,高战武.华北渤海湾盆地地震的构造特征.华北地震科学,2003,21(2):7~14
Chen G G, Xu J, Gao Z W. Seismotectonic features of the Bohai Bay Basin in North China. *North China Earthquake Sciences* (in Chinese), 2003, 21(2): 7~14
- [13] 赖晓玲,李松林,孙译.渤海及邻区3次7级以上地震的深部构造背景.大地测量与地球动力学,2007,27(1):31~33
Lai X L, Li S L, Sun Y. Deep tectonic background of three $M_s > 7.0$ strong earthquakes in Bohai and its adjacent region. *Journal of Geodesy and Geodynamics* (in Chinese), 2007, 27(1): 31~33
- [14] 魏光兴,季同仁,李秉锋.渤海地震序列及其特征.地震地质,1984,6(1):21~29
Wei G X, Ji T R, Li B F. Characteristics of magnitude 7.4 earthquake sequence in the Bohai area. *Seismology and Geology* (in Chinese), 1984, 6(1): 21~29
- [15] 环文林,汪素云,常向东等.渤海地震活动特征.地震研究,1989,12(1):1~9
Huan W L, Wang S Y, Chang X D, et al. Characteristics of seismicity of Bohai Sea. *Journal of Seismology Research* (in Chinese), 1989, 12(1): 1~9
- [16] 刁守中,蒋海昆.渤海及其邻区地震活动特征和构造涵义.地震学刊,1990,3:7~17
Diao S Z, Jiang H K. The characteristic of the seismicity in the Bohai Sea and the adjacent region and its tectonic implication. *Journal of Seismology* (in Chinese), 1990, 3: 7~17
- [17] 魏光兴,刁守中,周翠英.郯庐带地震活动性研究.北京:地震出版社,1993. 63~70
Wei G X, Diao S Z, Zhou C Y. Research on Seismic Activity of Tan-Lu Fault Zone (in Chinese). Beijing: Seismological Press, 1993. 63~70
- [18] 徐杰,张进,周本刚等.渤海东南部NE向黄河口-庙西北新生断裂带的存在.地震地质,2007,29(4):845~851
Xu J, Zhang J, Zhou B G, et al. The newly-generated NE-trending Yellow River estuary-Northwest Miao fault zone in southeastern Bohai basin. *Seismology and Geology* (in Chinese), 2007, 29(4): 845~851
- [19] 徐杰,高战武,孙建宝等.1969年渤海7.4级地震区地震构造和发震构造的初步研究.中国地震,2001,17(2):121~133
Xu J, Gao Z W, Sun J B, et al. Analysis of structures in 1969 Bohai Sea $M_s 7.4$ earthquake area and discussion about the causative structure. *Earthquake Research in China* (in Chinese), 2001, 17(2): 121~133
- [20] Xu J, Gao Z W, Song C Q. Newly generated seismotectonic zones in north China and its regional seismotectonic framework. *Scientific Geologica Sinica*, 2001, 10(3): 159~168
- [21] 胡政,丁东.渤海地震震中附近地区浅层地质构造特征.

- 地震学刊,1990,**3**:26~32
- Hu Z, Ding D. The characteristics of the shallow geological structure in the adjacent region of the epicenter of the Bohai Sea earthquake. *Journal of Seismology* (in Chinese), 1990, **3**:26~32
- [22] Demirbag E, Rangun C, Le Pichon X, et al. Investigation of the tectonics of the Main Marmara Fault by means of deep-towed seismic data. *Tectonophysics*, 2003, **361**:1~19
- [23] Armijo R, Pondard N, Meyer B, et al. Submarine fault scarps in the Sea of Marmara pull-apart (North Anatolian Fault): Implications for seismic hazard in Istanbul. *Geochemical Geophysics Geosystems* (*G³*), 2005, **6**(6), Q06009, doi: 10.1029/2004GC000896
- [24] Cormier M H, Seeber L, McHugh C M, et al. North Anatolian Fault in the Gulf of Izmit (Turkey): rapid vertical motion in response to minor bends of a non-vertical continental transform. *Journal of Geophysical Research*, 2006, **111**, B04012, doi: 10.1029/2005JB003633
- [25] 赵松龄, 杨光复, 苍树溪等. 关于渤海西岸海相地层与海岸线问题. 海洋与湖沼, 1978, **9**(1):15~25
- Zhao S L, Yang G F, Cang S X, et al. On the marine stratigraphy and coastlines of the western coast of the gulf of Bohai. *Oceanologia et Limnologia Sinica* (in Chinese), 1978, **9**(1):15~25
- [26] 王绍鸿. 莱州湾西岸晚第四纪海相地层及其沉积环境的初步研究. 海洋与湖沼, 1979, **10**(1):9~22
- Wang S H. A preliminary study of marine bed and its depositional conditions in Late Quaternary off the west coast of Laizhou Bay. *Oceanologia et Limnologia Sinica* (in Chinese), 1979, **10**(1):9~22
- [27] 中国科学院海洋研究所海洋地质研究室. 渤海地质. 北京: 科学出版社, 1985. 161~223
- Department of Marine Geology, Institute of Oceanology, Academia Sinica. *Geology of the Bohai Sea* (in Chinese). Beijing: Science Press, 1985. 161~223
- [28] 庄振业, 许卫东, 刘东生等. 渤海南部 S3 孔晚第四纪海相地层的划分及环境演变. 海洋地质与第四纪地质, 1999, **19**(2):27~35
- Zhuang Z Y, Xu W D, Liu D S, et al. Division and environmental evolution of late Quaternary marine beds of S3 hole in the Bohai Sea. *Marine Geology & Quaternary Geology* (in Chinese), 1999, **19**(2):27~35
- [29] 刘建国, 李安春, 徐方健. 渤海泥质区柱状沉积物的重矿物特征及其环境意义. 海洋地质与第四纪地质, 2007, **27**(增刊):11~15
- Liu J G, Li A C, Xu F J. Heavy mineral characteristics of core sediments in Bohai Sea mud area and their environmental implication. *Marine Geology & Quaternary Geology* (in Chinese), 2007, **27**(Suppl.):11~15
- [30] 刘升发, 庄振业, 吕海青等. 埕岛及现代黄河三角洲海域晚第四纪地层与环境演变. 海洋湖沼通报, 2006, **4**:32~37
- Liu S F, Zhuang Z Y, Lü H Q, et al. The strata and environmental evolution in the late Quaternary in the Chengdao area and modern Yellow River delta coast. *Transactions of Oceanology and Limnology* (in Chinese), 2006, **4**:32~37
- [31] 蔡东升, 罗毓晖, 武文来等. 渤海浅层构造变形特征、成因机理与渤中拗陷及其周围油气富集的关系. 中国海上油气(地质), 2001, **15**(1):35~42
- Cai D S, Luo Y H, Wu W L, et al. Shallow tectonic deformation and its relationship to hydrocarbon enrichment in Bozhong depression and adjacent areas, Bohai Bay basin. *China Offshore Oil and Gas (Geology)* (in Chinese), 2001, **15**(1):35~42
- [32] 吕悦军, 唐荣余, 彭艳菊等. 渤南油田工程地震研究. 北京: 地震出版社, 2003. 36~65
- Lü Y J, Tang R Y, Peng Y J, et al. Engineering Seismic Research of Bonan Oil Field (in Chinese). Beijing: Seismological Press, 2003. 36~65
- [33] 马宗晋, 傅征祥, 张郢珍等. 1966~1976 年中国九大地震. 北京: 地震出版社, 1982. 7~32
- Ma Z J, Fu Z X, Zhang C Z, et al. Nine Strong Earthquakes in China (1966 ~ 1976) (in Chinese). Beijing: Seismological Press, 1982. 7~32
- [34] 魏光兴, 季同仁, 杨家岭. 渤海地区地震基本参数的校订. 地震研究, 1983, **6**(2):179~188
- Wei G X, Ji T R, Yang J L. A revision of basal parameters for earthquakes in the Bohai Sea area. *Journal Seismology Research* (in Chinese), 1983, **6**(2):179~188
- [35] 徐杰, 冉勇康, 单新建等. 渤海海域第四系发育概况. 地震地质, 2004, **26**(1):24~32
- Xu J, Ran Y K, Shan X J, et al. Development of the quaternary system in the Bohai Sea area. *China Seismology and Geology* (in Chinese), 2004, **26**(1):24~32
- [36] 沿海大陆架及毗邻海域油气区石油地质编写组编. 渤海海域探区、黄海海域诸盆地、沿海大陆架及毗邻海域油气区. 中国石油地质志(卷十六). 北京: 石油工业出版社, 1990. 3~330
- Editor Committee of "Petroleum Geology of China: Oil and Gas Bearing Areas on the Continental Shelf and Its Neighboring Regions". *Petroleum Geology of China Vol. 16: Oil and Gas Bearing Areas on the Continental Shelf and Its Neighboring Regions (Part 1)* (in Chinese). Beijing: Petroleum Industry Press, 1990. 3~330
- [37] 中田高, 岛崎邦彦. 海底の地震の巢を探る. 科学, 1993, **63**(9):593~599
- Nakata T, Shimazaki K. Discussion on marine earthquake sources. *Science* (in Japanese), 1993, **63**(9):593~599