

# 渤海海峡跨海通道地质条件调查与分析

赵铁虎<sup>1,2</sup>, 齐君<sup>1,2</sup>, 梅赛<sup>1,2</sup>, 高小惠<sup>1</sup>, 冯京<sup>1</sup>, 李攀峰<sup>1</sup>

1. 中国地质调查局青岛海洋地质研究所, 国土资源部油气资源和环境地质重点实验室, 青岛 266071
2. 青岛海洋科学与技术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

**摘要** 渤海海峡跨海通道建设是一项重大战略性涉海工程,对工程区域进行系统的地质地球物理调查与分析是工程前期的基础工作。在收集已有资料 and 实际勘测基础上,分析了渤海海峡海底地貌特征,初步查明了新近纪以来的地层岩性结构,甄别出了主要的活动断裂,开展了渤海海峡及邻区地震活动性分析,并对潜在震源区进行了划分。结果表明:侵蚀陡坎、沟槽、侵蚀洼地、潮流沙脊及水下浅滩等是通道建设的不利因素;沿长岛列岛链基岩埋深较浅,有利于海底隧道施工;拟建跨海通道位于震级上限6.0~7.0潜在震源区,其中,7.0级潜在震源区主体位于张家口-蓬莱断裂带,是工程抗震的重点设防区。

**关键词** 渤海海峡;跨海通道;地质条件

渤海海峡跨海通道具有重大战略意义<sup>[1-3]</sup>,其主要设想是利用渤海海峡有利的地理条件,从山东蓬莱经长岛至辽宁旅顺,建设公路和铁路结合的跨越渤海的直达快捷通道,可以改变中国的铁路运输和公路运输等现有的交通格局,对促进环渤海区域经济全面协调一体化发展、振兴东北老工业基地以及巩固国防等都具有十分重要的意义<sup>[4]</sup>。

自20世纪90年代初提出初步设想,许多专家学者通过分析渤海海峡地形、地貌、地质、气候、海洋及环境等基本建设条件,提出了不同建设方案,并进行了分析比较<sup>[5]</sup>,其中,渤海海峡自然地理条件,尤其是海域地质条件是科学论证跨海通道工程的重要基础。渤海海峡及附近区域已有的遥感、地质、地球物理等研究表明,对陆域断裂的认识虽然不尽统一,但由于测年等技术的支持,在断裂活动性方面认识相对统一;在海域,由于实测资料相对较少,且受调查手段限制,对其断裂的认识仍然是众说纷纭。总体来看,在郯庐断裂中段渤海海域由于缺乏系统的实测资料,对

断裂展布的认识仍存在较大争议。张家口-蓬莱断裂带在海域部分的研究非常薄弱,有待进行深入的研究。渤海、北黄海内新构造时期NE向和NW向断裂较为发育,应予以重视。长岛周边海域为地震密集区,尤其是山东半岛北部近海区域,小震微震不断,其与断裂活动性的关系密切。岛屿间海底冲刷沟槽较多,深度较大,也是将来跨海通道工程建设的不利因素。本文在实测资料基础上,综合历史资料和已有成果,分析该区域地形地貌、地层岩性结构、新近纪以来主要地层断裂性质以及区域地震活动情况。

## 1 材料与方法

### 1.1 海域地球物理调查

2012—2015年,中国地质调查局青岛海洋地质研究所在渤海海峡跨海通道调查区系统开展了浅地层剖面、侧扫声纳及高分辨率地震地球物理勘测,获得大量高分辨率的第一手资料。为便于对比解释,测线穿过Bc-1、DLC70-1、CD5和NYS-102等已有的钻

孔位置(图1)。调查使用的仪器分别为英国SBP/AE型浅地层剖面系统、美国EdageTech4200Fs型侧扫声纳系统及美国Geometrics公司GelEel型数字固体缆采集系统。辅助设备包括320M型测深仪、DSM-132集成DGPS接收机等,导航定位中误差为亚米级。

### 1.2 数据处理与分析

浅地层剖面人机交互解释使用Survey Engine Seismic+软件进行,声图解译中的平均速度根据以往经验取值并与钻孔资料进行对比确定。采用与渤海Bc-1孔、DLC70-1孔及北黄海海域的NYS-102孔等钻孔岩性界面深度资料对比求平均的方法,确定出在探测范围内地层平均速度取值为1600 m/s。侧扫声纳数据处理使用CODA镶嵌软件进行,经过TVG调整、海底追踪、重叠声图区处理和测量点定位偏差校正等处理,最后得到反映海底地貌细节特征的镶嵌声图。高分辨率地震数据处理采用OMEGA软件系统,根据研究区海域水文及地质环境特点,针对浅海高分辨率地震资料多次波发育、噪声水平高及

收稿日期:2016-08-04;修回日期:2016-09-30

基金项目:国家海洋地质调查专项(GZH201200504)

作者简介:赵铁虎,研究员,研究方向为海洋地质、地球物理,电子信箱:zhao-tiehu@163.com

引用格式:赵铁虎,齐君,梅赛,等.渤海海峡跨海通道地质条件调查与分析[J].科技导报,2016,34(21):39-47;doi:10.3981/j.issn.1000-7857.2016.21.005

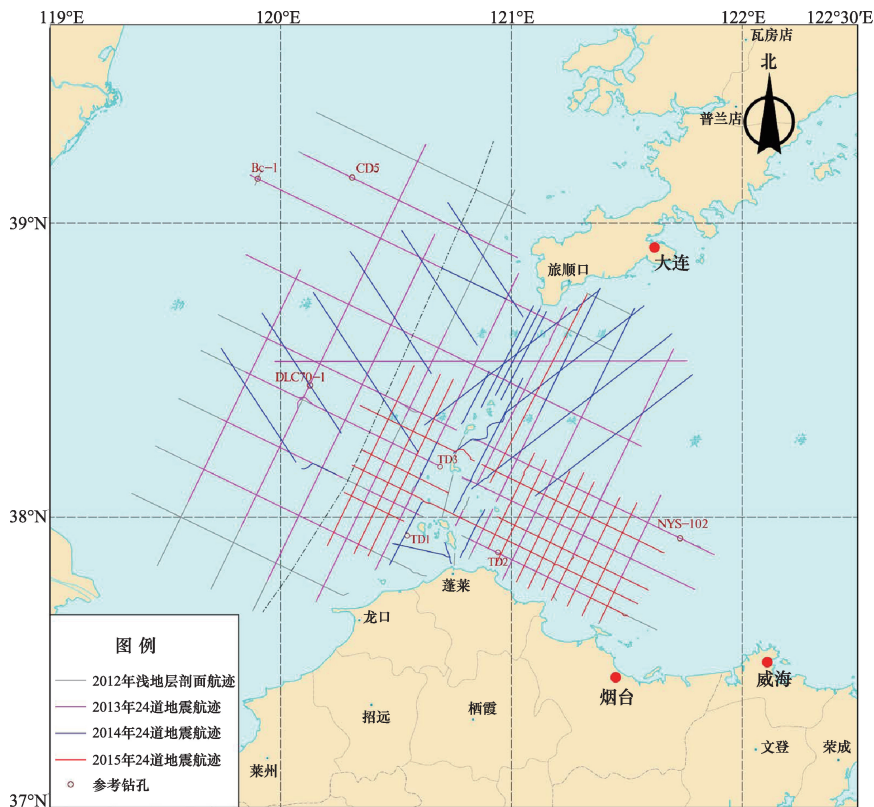


图1 调查测线和相关钻孔位置示意

Fig. 1 Locations of survey line and related drilling

速度分析困难等问题,通过重采样处理、电缆噪声衰减、邻船干扰和异常振幅去除、多次波压制以和高精度速度分析等一系列技术措施,实现了高质量的叠前时间偏移成像。

### 1.3 区域地震资料来源

区域历史地震目录指区域范围内有史以来  $M_s \geq 4.7$  级的地震目录,主要来源于《中国历史强震目录(公元前23世纪—公元1911年)》、《中国近代强震目录(公元1912年—1990年)》及中国地震局台网中心汇编的《中国地震详目》(1970年1月—2015年4月)。现代地震目录来自中国地震局台网中心的地震数据库(1970年1月—2015年4月),其中地震参数由仪器记录得到。

## 2 结果与讨论

### 2.1 地形地貌特征

渤海海峡是构成渤海地区“三湾一峡”(辽东湾、渤海湾、莱州湾和渤海海峡)挟持渤海中央盆地这一海域轮廓的组成单元之一,其海底地势总体呈北深

南浅态势,平均水深 25 m,局部最大水深超过 86 m。海峡南部岛屿众多,在南北 56.4 km、东西 30.8 km 的海域内分布有 32 个岛屿,构成了著名的庙岛群岛,总体呈 NE 走向展布,与郯庐断裂带走向基本一致<sup>[5-8]</sup>。众多岛屿将海峡分隔成一系列相间排列的东西向峡道,在潮流侵蚀作用下,发育形成了老铁山水道、小钦水道、大钦水道、北砣矶水道、南砣矶水道和登州水道等与 NW 向断裂走向近乎一致的侵蚀地貌。根据实际调查得到的水深、侧扫声纳以及浅地层剖面资料编制的调查区地貌类型分布图全面反映了研究区地形地貌形态(图2)。其中,海底侵蚀陡坎、沟槽、侵蚀洼地、潮流沙脊及水下浅滩是通道工程建设的不利因素。

#### 2.1.1 侵蚀陡坎、沟槽和洼地

侵蚀陡坎主要发育在海底地形变化较大和强水动力的环境,地貌形态表现为坡度急剧变化,水深起伏剧烈,因此陡坎常与冲蚀沟槽相伴而生,区内陡坎坡度大多都在  $1^\circ \sim 6^\circ$ 。海底沟槽在声图上表现为负向地貌单元,往往与海底

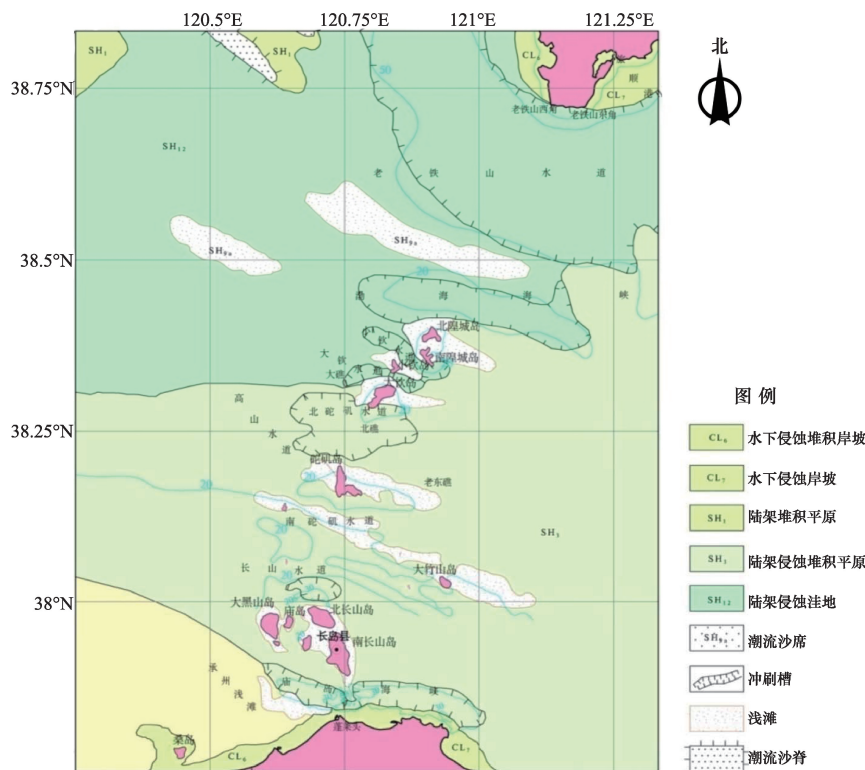


图2 渤海海峡及邻区地貌

Fig. 2 Geomorphological map of Bohai strait and its adjacent area

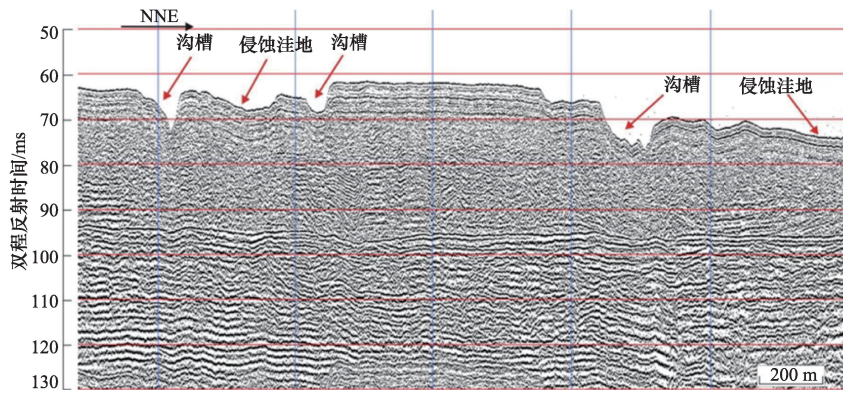


图3 老铁山水道南侧侵蚀沟槽及洼地断面形态

Fig. 3 Section shape of groove and erosion depression in south side of Laotieshan watercourse

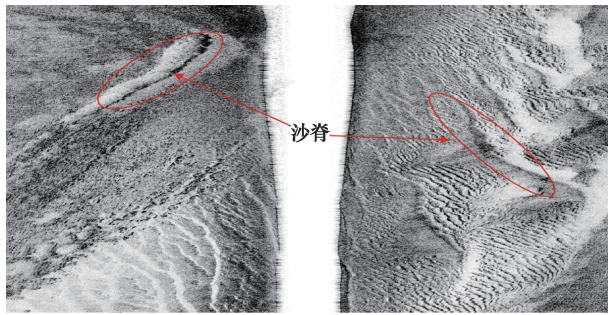


图4 典型潮流沙脊声图

Fig. 4 Typical sonar figure of tidal ridge

侵蚀洼地相连,区内沟槽地貌广为发育。侵蚀陡坎、沟槽和洼地等海地地貌以老铁山水道南侧最为典型(图3)。

### 2.1.2 潮流沙脊

潮流沙脊主要分布在砣矶岛南侧附近海区,规模较小,走向多为东西向,与砣矶岛沿岸呈亚平行状,沙脊长度在50~100 m不等,高度多在3 m左右,在其周围多伴生发育连续沙波地貌,分析其成因多为潮流冲刷动力作用形成,沉积物类型以砂质为主(图4)。

### 2.1.3 水下浅滩

水下浅滩是一种松散的高速堆积砂体或泥质沉积物,声学剖面呈楔形或丘形,内部为S型或斜交前积反射结构,层理清晰,下超于底部侵蚀面,厚度变化大。区内水下浅滩主要分布在砣矶岛、高山岛、大竹山岛等岛屿周围,浅滩与沟槽连接处水深急剧变化(图5)。

## 2.2 地层岩性结构

研究表明<sup>[9-11]</sup>,长山列岛地区新元古代蓬莱群是该区变质岩系层位中的

顶端浅变质构造层,诸岛屿出露基岩主要为蓬莱群辅子乔组地层(ZpF),主要岩性为厚层石英岩夹千枚岩及板岩,为一套浅变质沉积岩,角度不整合于新太古代胶东群、古元古代粉子山群上。据沉积环境、岩性标志层所做的区域地层对比研究认为,该区辅子乔组相当于大连旅顺地区的永宁组地层,二者的地质历史与沉积环境演化史一致<sup>[12]</sup>。高分辨率地震剖面探测所揭示的声学反射基底推断为辅子乔组在海底的延伸,其上部为新近系和第四系地层所覆盖,渤海海峡海底的最大覆盖厚度约400 m(图6)。

### 2.2.1 层位划分

在浅地层探测剖面有效地层双程反射时间150 ms之内,可划分出4个主要声学反射界面,自海底(T<sub>0</sub>)至下分别命名为T<sub>1</sub>、T<sub>2</sub>、T<sub>3</sub>和T<sub>2</sub><sub>1</sub>,这些反射界面将海底地层自上而下划分为Qh、Qp<sup>34</sup>、Qp<sup>33</sup>、Qp<sup>32</sup>和Qp<sup>31</sup>共5个地层单元。在高分辨率地震探测剖面上有效地层约双程反射时间500 ms之内,共划分出6个主要声学反射界面,自海底

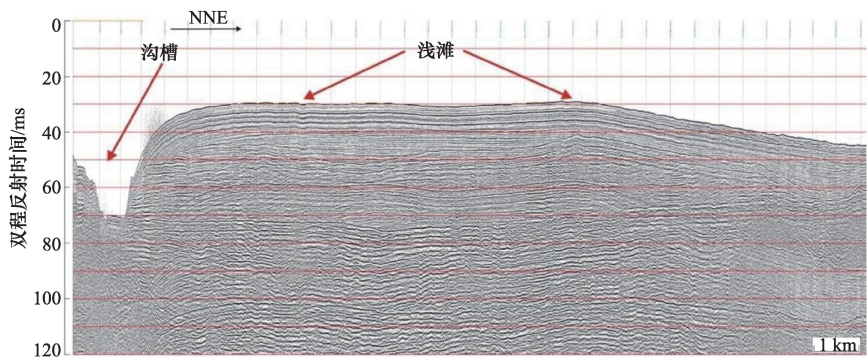
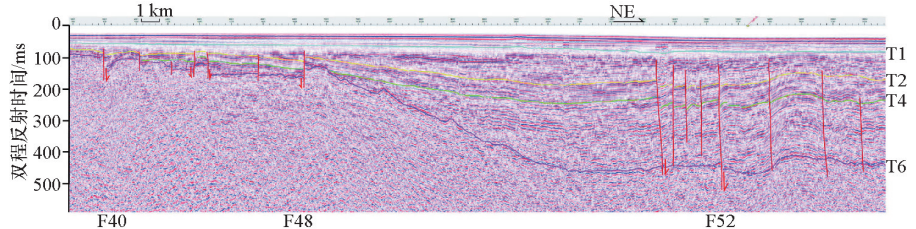


图5 浅滩在浅地层剖面表现形态

Fig. 5 Form of shoal in shallow subbottom profile



T1—全新统底界面;T2—晚更新统底界面;T4—第四系底界面;T6—新近系底界面

图6 渤海海峡长岛以东海域典型地震剖面解释

Fig. 6 Explanation of typical seismic profile in the east of Changdao island of Bohai strait

(T0)至下分别命名为T1、T2、T3、T4、T5和T6(局部即不规则基岩面),这些反射界面将海底地层自上而下划分为Qh、Qp<sup>3</sup>、Qp<sup>2</sup>、Qp<sup>1</sup>、N<sub>2</sub>和N<sub>1</sub>共6个地层单元。本区声学反射层位划分见表1,其中,全新统(Qh)和晚更新统(Qp)的各反射界面主要结合钻孔标定(图7),而晚更新统以下的各地层反射界面则结合地震剖面反射特征和前人研究成果经验得来。各地震反射层的地层速度,浅部主要结合区内钻孔资料进行地层标定获得,深部则主要根据本次高分辨率地震处理剖面的叠加速度利用Dix公式得到的层速度确定。

### 2.2.2 岩性结构

第四系(Q):在多数岛屿及海底广泛分布,尤其在大钦岛、砣矶岛、大黑山岛、南长山岛较发育,由南向北逐渐增厚<sup>[3]</sup>。在跨海通道西侧渤海湾盆地海域,经新生代裂陷作用后长期沉降,形成巨厚的新生代沉积地层,最厚超过700 m,且普遍受郯庐断裂渤海段、张家口-蓬莱断裂带和庙西北-黄河口-临邑新生断裂带的影响产生地层严重挤压褶皱变形<sup>[4]</sup>。在通道所处的海域

为胶辽隆褶区,由于基底隆升,第四系沉积厚度相对较小,一般在100~250 m(图8)。

全新统(Qh)在全区分布广泛,在测区的西北部为潮流沙席和潮流沙脊沉积地层,沉积厚度10~20 m,粒度相对较粗,沉积物主要受全新世以来的潮流动力因素控制。在山东半岛北部长岛以东海域全新统沉积最发育,厚度较大,约15~25 m,岩性为灰色黏土质粉砂。而在老铁山水道区域由于冲刷剥蚀该层缺失,为残留沉积所替代。

更新统(Qp<sup>3</sup>)主要分布于北黄城岛以南海域。其中,Qp<sup>3a</sup>底界面为起伏的

表1 研究区地层划分

Table 1 Stratigraphic division in the study area

地层单元	地层时代	层速度/(m·s <sup>-1</sup> )	地层底界面	底界面颜色
Qh	全新统	1600	T1	—
Qp <sup>3a</sup>	晚更新统	1750	T2 <sub>3</sub>	—
Qp <sup>3b</sup>			T2 <sub>2</sub>	—
Qp <sup>3c</sup>			T2 <sub>1</sub>	—
Qp <sup>2</sup>	中更新统	1980	T2	—
Qp <sup>1</sup>	早更新统	2100	T3	—
N <sub>2</sub>	上新统	2180	T4	—
N <sub>1</sub>	中新统	2300	T5	—
			T6	—

下切侵蚀面T2<sub>3</sub>,是晚更新世晚玉木冰期形成的陆相沉积,古河道发育,该层厚度在山东半岛北部近岸为5~15 m,远岸厚度增大为15~30 m。Qp<sup>3c</sup>为晚更

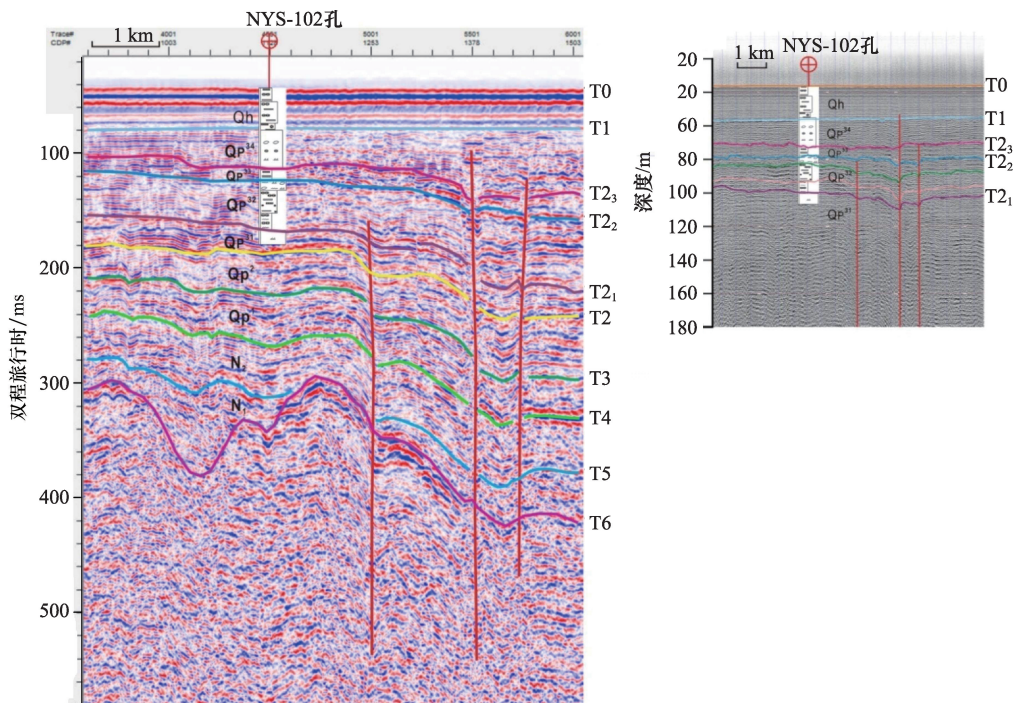


图7 NYS-102孔地层标定

Fig. 7 Stratigraphic calibration on the basis of NYS-102 drilling

新世晚玉木间冰期形成的海相地层,在砣矶岛以南至山东半岛北岸的跨海通道区附近海域,该层厚度小于5 m,局部由于上部地层侵蚀而缺失。Qp<sup>34</sup>和Qp<sup>33</sup>在老铁山水道海域缺失。Qp<sup>32</sup>是晚更新世早玉木冰期形成的陆相地层。Qp<sup>32</sup>在跨海通道区沉积较薄,厚度10 m以下,东西两侧厚度逐渐增大至40 m左右。Qp<sup>31</sup>是晚更新世玉木-里斯间冰期高海面时期形成的海相地层。T3为中更新统(Qp2)和早更新统(Qp1)的分界面,仅在跨海通道东西两侧海域可连续追踪。

新近系(N):在陆岛地区为两期火山喷发的玄武岩,下部气孔构造发育,含伊丁石化橄榄石斑晶;上部为深灰黑色、致密、坚硬的玄武岩,偶见辉石和伊丁石橄榄石斑晶。其主要分布于大黑山岛,最大厚度达70 m<sup>[13]</sup>。海域仅在通道东侧地震剖面上有显示,其中,T5为上新统(N2)和中新统(N1)的分界面,T6为新近系(N1+N2)的底界面。跨海通道路由以东的北黄海盆地区由于新近纪以来构造稳定、沉降速率较低,新近系地层沉积较薄,因此,T6反射界面在通道路由区及以东海域的地震探测剖面上普遍可见,为非常明显的整合界面,反射能量强,连续性好,深度起伏

较大,局部为向上凸起的火山岩侵入体顶界。新近系底界面在靠近通道区岛屿附近和山东半岛北部近岸埋深小于100 m,在通道以西进入渤海湾盆地区和通道以东进入北黄海盆地区埋深增大至500~600 m(图8)。

### 2.3 断裂活动特征

#### 2.3.1 断裂发育的新构造环境

根据已有研究<sup>[14-20]</sup>,新构造时期以来,在渤海海峡及邻区存在两种类型的活动断裂构造,即继承活动的断裂带和新生断裂带。前者如NE向营口-潍坊断裂带北段,NNE向沂沭断裂带、NNE-NE向金州断裂和NE向千里岩断裂,以及NW向张家口-蓬莱断裂带;后者有NE向庙西北-黄河口-临邑断裂带和唐山-河间-磁县断裂带等。这些NNE-NE向断裂带和NNW向断裂带,分别具有明显的右旋和左旋走滑活动的特征,它们相互交织,构成新构造时期地壳共轭剪切破裂控制的块断构造格局(图9),对该区的新构造活动及地震活动起着控制作用,对渤海海峡构造地貌的形成、演化也有明显影响。庙西北-黄河口-临邑断裂带断裂带是新构造期新发育的构造

带,其向西南斜穿济阳拗陷延伸到临邑以西,1597年7.0级和1969年7.4级渤海地震均发生于此带,它也是渤海东南部的地震带。

跨海通道西侧的渤海湾盆地自新近纪开始,逐渐整体沉降而成为统一的大型拗陷盆地,在中新世早期堆积以馆陶组,但从中新世中期起即转入新构造时期,堆积了明化镇组和第四系。由这些新近纪和第四纪地层组成的盆地上部盖层,呈面状覆盖了整个渤海湾盆地,一般厚1000~1500 m,在渤中凹陷最厚达4200 m左右<sup>[21]</sup>。向东进入海峡地区后,盖层迅速减薄,直接上覆于新元古界变质基底之上,最大厚度约400 m,渤海海峡地区新构造变形主要反映为上部盖层的构造变形。

#### 2.3.2 活动断裂分布

在采集的高分辨率地震剖面上,断层两侧的反射特征表现为多个连续性好的反射波组自下而上发生系统的错移、弯曲或终止。发现的断点都较清晰,断点处断层形态多数为地层受牵引弯曲、下拉或褶皱变形,不乏有的褶皱

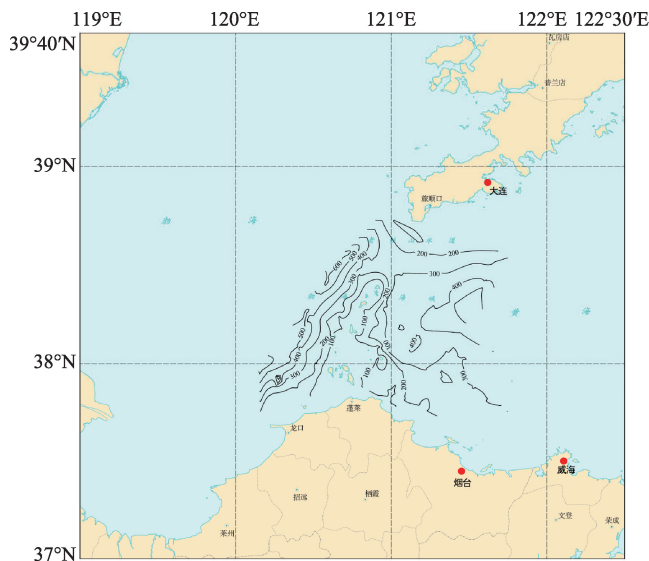
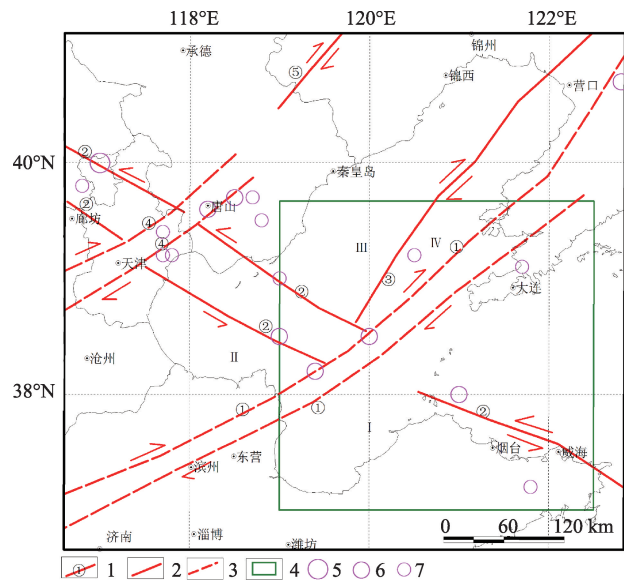


图8 第四系底界面(T4)埋深图(单位:m)

Fig. 8 Buried depth distribution of bottom interface of Quaternary (T4) (unit: m)



I—渤东南活动地块; II—渤西南活动地块; III—渤西北活动地块; IV—渤东北活动地块; ①庙西北-黄河口-临邑断裂带; ②张家口-蓬莱断裂带大致边界; ③营口-潍坊断裂带北段西界; ④唐山-河间-磁县断裂带; ⑤朝阳-北票断裂带; 1—主要活动断裂边界; 2—继承活动断裂带; 3—新生断裂带; 4—研究区域; 5—M8.0~8.5级地震; 6—M7.0~7.9级地震; 7—M6.0~6.9级地震

图9 渤海地区新构造格局

Fig. 9 Neotectonic framework of Bohai sea region

变形剧烈,断面几乎直立,且绝大多数表现出正断活动的特点。也有少数为地层错断形成一定断距,从几十厘米到十几米不等,个别断距可达 30~40 m (图 10)。断点两侧的相应地层常有厚度差异,上升盘薄,下降盘较厚,不同层位的断距、地层变形自上而下往往增大变强,反映了断层多次错动的活动历史。通过系统解释,追踪出活动断裂 60 余条(图 11),其中,新近纪活动断裂有 2 条,其他均为晚更新世活动断裂。在跨海通道西侧地震剖面上断点多表

现为晚第四系沉积地层的活动断裂和褶皱构造变形,断点的最新活动时代绝大多数为晚更新世中晚期,而在跨海通道东侧地震剖面上新近纪基底全线可见,断点大多数断至基底,且断距较大,为正断层。

## 2.4 地震活动性

### 2.4.1 区域地震分布特征

根据历史地震目录以及 1970 年 1 月—2015 年 4 月期间中国地震局台网中心汇编资料,编制了研究区及邻域地震震中分布图(图 12)。其中,研究区

范围内共有  $M_s \geq 4.7$  级的地震 29 次,包括  $M_s$  4.7~4.9 级地震 10 次、 $M_s$  5.0~5.9 级地震 11 次、 $M_s$  6.0~6.9 级地震 4 次以及  $M_s$  7.0~7.9 级地震 4 次。最早的一次地震是公元 1346 年山东莱州湾 5 级地震,最大地震为 1888 年渤海湾 7.5 级。区域历史强震的特点首先表现为 7 级以上地震的频度较高,且比较集中。在  $38^\circ\text{N}\sim 39^\circ\text{N}$  和  $119^\circ\text{E}\sim 121^\circ\text{E}$  之间的渤海海域,集中发生了 4 次 7 级以上的大地震,形成了华北地震区 7 级以上大震最集中的地区。而其他海域,如北部的辽东半岛附近、南部莱州湾,没有或仅有 5 级左右的中等地震发生,在黄海海域发生 2 次 6 级地震。在陆地部分,如山东半岛、辽东半岛只有 6 级左右的中强地震。上述特征显示出历史中强地震活动空间分布的不均匀性,表现为集群性和条带状,大震周围中强地震集中,并形成 NE 向和 NW 向的地震条带。

现代中小地震震中分布表明区域现代中小地震活动频度较高,对比历史地震可以看出,二者总体上显示了较好的 NW 向条带的一致性。其中现代中小地震主要集中在渤海四次强震周围,

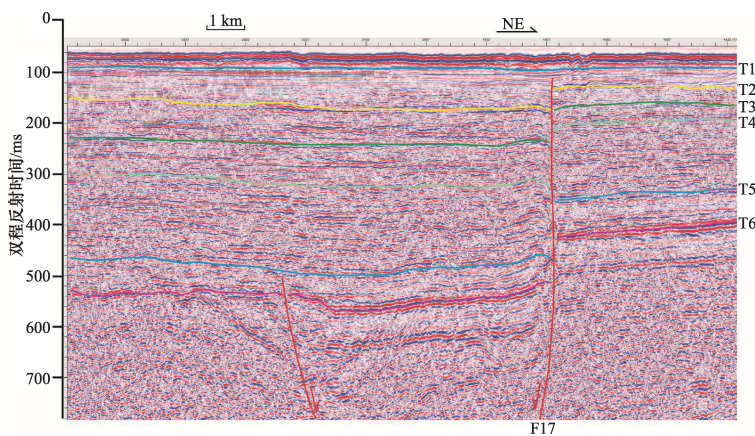


图 10 北黄海盆地西缘断裂剖面解释图

Fig. 10 Explanation of fault section in the west margin of the Northern Yellow Sea basin

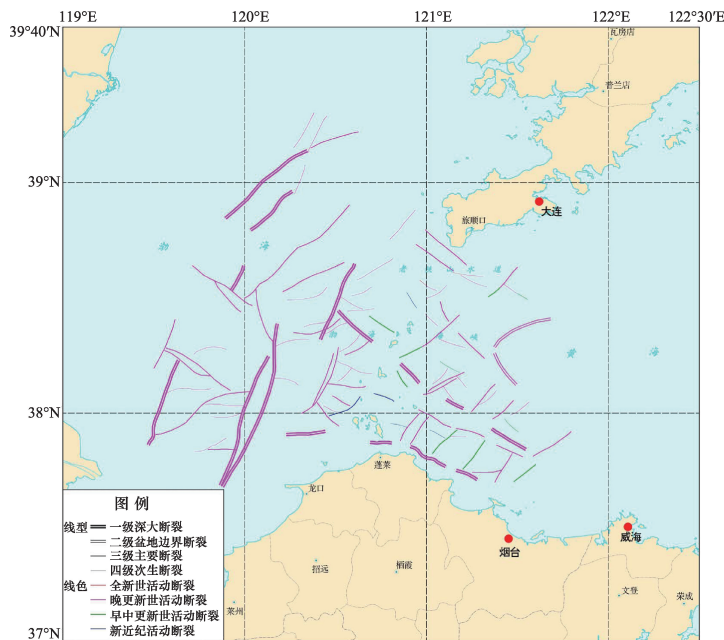


图 11 研究区解释断裂展布

Fig. 11 Distribution of explain faults in the study area

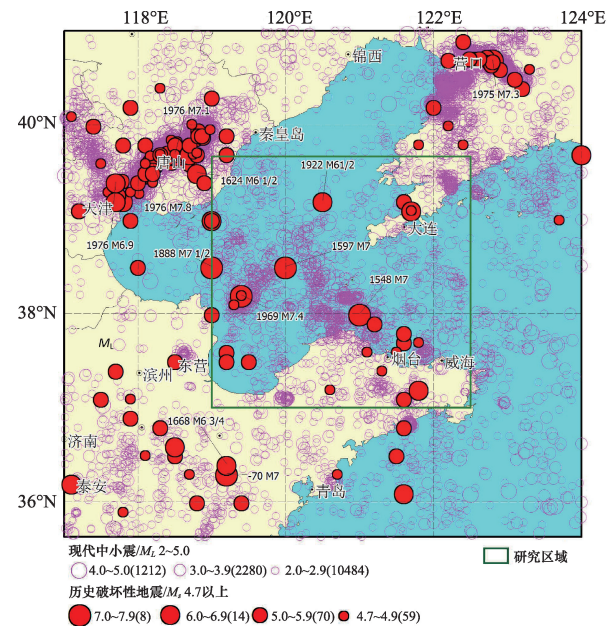


图 12 研究区及邻域地震震中分布

Fig. 12 Distribution of earthquake epicenters in the study area and its adjacent regions

表2 潜在震源区划分标志和依据

Table 2 Logo and basis of the division for potential seismic source area

潜在震源区	划分标志和依据
震级上限8.0级	① 发生过8.0级地震。 ② 发生在大型隆起与大型拗陷交接地带的隆起边缘部位上走滑分量较大的北北东向全新世活动的深大断裂带上。 ③ 郯庐断裂带全新世强烈活动的走滑、倾滑段。 ④ 发震部位往往有其他组方向断裂与之交汇。 ⑤ 上地幔隆起、地壳厚度陡变带,壳内存在低速层及地球物理场的梯度带。
震级上限7.0~7.5级	① 曾发生过7.0级左右地震。 ② 规模较大的北北东、北西向以正倾滑为主的晚第四纪活动断裂带,尤其块体边界断裂带。 ③ 发生在区域地球物理场梯度带和上地幔隆起、幔拗边缘及其转折部位。
震级上限6.0~6.5级	① 发生过6级左右地震。 ② 具有7级以上发震构造条件的区域均有可能发生6.0级和6.5级地震。 ③ 第四纪以来活动断裂差异活动明显的地段及多组断裂交汇部位。 ④ 第四纪断陷盆地陡深一侧。

形成现代地震密集区。另外,黄海海域内的小震活动也比较频繁,但震级较小,分布图象不明显,呈无序弥散状。研究区的地震分布与NE向庙西北-黄河口-临邑断裂带和NW向张家口-蓬莱断裂带的位置基本相同,且地震密集区主要分布在断裂带相互交错位置,显示出这两条断裂带对渤海海峡地区地震活动的控制作用。

### 2.4.2 潜在震源区划分

潜在震源区系指未来可能发生破坏性地震的地区,在分析研究地震区资料的基础上,依据地震构造、地球物理场、地震活动性等信息综合分析确定。划分主要依据地震重复性原则和地震构造类比原则,即历史上发生过破坏性地震的地方,认为将来仍有可能发生类似的地震;在地震构造条件相同的地区,其发生地震的可能性也相似。此外,活动断裂的阶段性及古地震遗迹均是划分潜在震源区的重要考虑因素<sup>[22-23]</sup>。在综合区域地震活动和地震构造等研究成果基础上,归纳出区研究区强震的发震条件(表2),以此作为划分具有不同震级上限潜在震源区的标志和依据。

根据上述潜在震源区划分的原则、标志,在中国地震动参数区划图(2010)的潜在震源区划分方案基础上,结合区域及近场区地震构造、地震活动环境的研究成果对区内潜在震源区进行了划

分。区域共划分出85个潜在震源区,其中,构造潜在震源区71个背景潜在震源区14个(图13)。

### 3 结论

1) 渤海海峡跨海通道位于胶辽隆起上,该区基底隆升,尤其沿长山列岛岛屿链,新近系底界凸起(T6反射界面),基岩埋深小于100 m,有利于海底隧道施工。海底发育的侵蚀陡坎、沟槽、侵蚀洼地、潮流沙脊及水下浅滩是工程建设的不利因素。

2) 该区断裂发育,尤其是山东半岛北部近海为郯庐、张家口-蓬莱、蓬莱-栖霞断裂带交汇地带,岩石破碎程度较高,地壳结构复杂,为地震多发地段。而渤海海峡跨海通道的走向决定了该工程必须横穿张家口-蓬莱断裂带,因此,必须加强对该断裂带研究,并通过进一步的工作在该断裂带中寻找地层相对稳定、安全的通道。

3) 基于区域及近场区地震构造、地震活动环境的研究对区内潜在震源

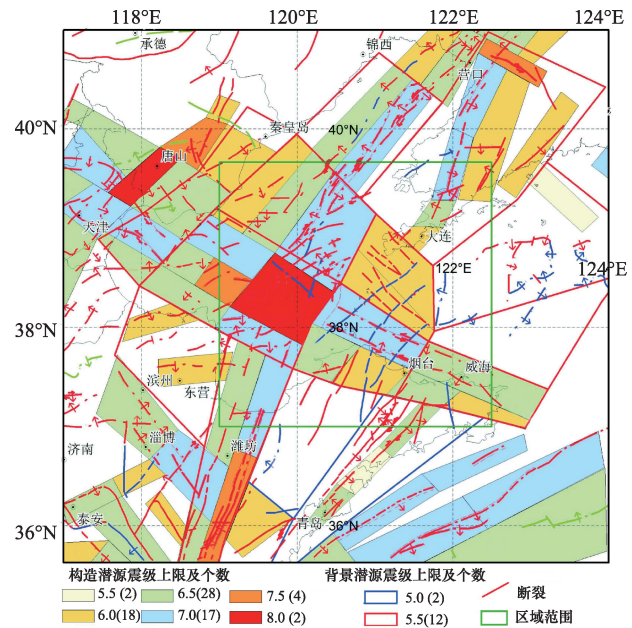


图13 潜在震源区划分

Fig. 13 Division of potential seismic source area

区进行的划分结果表明,渤海海峡跨海通道路线位于震级上限6.0~7.0级潜在震源区。其中,7.0级潜在震源区主体位于张家口-蓬莱断裂带,据地震探测剖面,该段部分断层明显错断了晚更新世早期地层,区内历史上发生过1548年7级地震,为满足工程需要,需对该区块进行更进一步的调查分析。

**致谢:** 本文工作得到中国地震局地质研究所研究员徐杰的指导和帮助,中国地震局地壳应力研究所助理研究员张力方给予协助!

参考文献 (References)

- [1] 王梦恕. 渤海海峡跨海通道战略规划研究[J]. 中国工程科学, 2013, 15(12): 4-9.  
Wang Mengshu. Strategic plan of Bohai strait cross-sea channel[J]. Engineering Sciences, 2013, 15(12): 4-9.
- [2] 柳新华. 渤海海峡跨海通道建设的必要性及紧迫性[J]. 中国工程科学, 2013, 15(12): 10-17.  
Liu Xinhua. The necessity and urgency of Bohai strait cross-sea channel construction[J]. Engineering Sciences, 2013, 15(12): 10-17
- [3] 刘良忠, 柳新华. 渤海海峡跨海通道建设与蓝色经济发展[M]. 北京: 经济科学出版社, 2012.  
Liu Liangzhong, Liu Xinhua. Bohai strait cross-sea channel construction and economic development of ocean[M]. Beijing: Economic Science Press, 2012.
- [4] 魏礼群, 柳新华. 渤海海峡跨海通道研究[M]. 北京: 经济科学出版社, 2009: 82-85.  
Wei Liqun, Liu Xinhua. The study of Bohai strait cross-sea channel[M]. Beijing: Economic Science Press, 2009: 82-85.
- [5] 杨子赓. 海洋地质学[M]. 济南: 山东教育出版社, 2009: 63-65.  
Yang Zigeng. Marine geology[M]. Jinan: Shandong Education Press, 2009: 63-65.
- [6] 耿秀山, 李善为, 徐孝诗. 渤海海底地貌类型及其区域组合特征[J]. 海洋与湖沼, 1983, 14(2): 128-137.  
Geng Xiushan, Li Shanwei, Xu Xiaoshi. The bottom geomorphological types and assembly characteristics in the Bohai sea[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 1983, 14(2): 128-137.
- [7] 中国科学院海洋研究所. 渤海地质[M]. 北京: 科学出版社, 1985: 204-207.  
Institute of Oceanology, Chinese Academy of Science. Bohai geology[M]. Beijing: Science press, 1985: 204-207.
- [8] 金翔龙, 郑开云. 庙岛群岛地质的初步观察[J]. 海洋与湖沼, 1964, 6(4): 364-369.  
Jin Xianglong, Zheng Kaiyun. Preliminary study on the geology of Miaodao islands[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 1964, 6(4): 364-369.
- [9] 初航, 陆松年, 王惠初, 等. 山东长岛地区蓬莱群辅子布组碎屑锆石年龄谱研究[J]. 岩石学报, 2011, 27(4): 1017-1028.  
Chu Hang, Lu Songnian, Wang Huichu, et al. U-Pb age spectrum of detrital zircons from the Fuzikuang Formation, penglai group in Changdao, Shandong province[J]. Acta Petrologica Sinica, 27( 4): 1017-1028.
- [10] 张文起. 胶东地区粉子山群及蓬莱群地层铅同位素组成探讨[J]. 山东地质, 1995, 11(1): 18-24.  
Zhang Wenqi. Discussion on lead isotope compositions of the Fnzishan and Penglai groups in the Jiaodong region[J]. Shandong Geology, 1995, 11(1): 18-24.
- [11] 朱光, 徐家炜, Fitches W R, 等. 胶北蓬莱群的同位素年龄及其区域大地构造意义[J]. 地质学报, 1994, 68(2): 158-172.  
Zhu Guang, Xu Jiawei, Fitches W R, et al. Isotopic ages of the Penglai group in the Jiaobei belt and their geotectonic implications[J]. Acta Geologica Sinica, 1994, 68(2): 158-172.
- [12] 赵铁虎, 高小惠, 齐君. 渤海海峡跨海通道区浅地层结构探测[J]. 海洋测绘, 2014, 34(2): 38-42.  
Zhao Tielu, Gao Xiaohui, Qi Jun. Shallow structure characteristics in trans-sea channel of Bohai strait[J]. Hydrographic Surveying and Charting, 2014, 34(2): 38-42.
- [13] 谭忠盛, 吴永胜, 万飞. 渤海海峡跨海工程自然条件分析[J]. 中国工程科学, 2013, 15(12): 32-38.  
Tan Zhongsheng, Wu Yongsheng, Wan Fei. Analysis of natural condition for Bohai strait cross-sea engineering[J]. Engineering Sciences, 2013, 15(12): 32-38.
- [14] 徐杰, 周本刚, 计凤桔, 等. 渤海地区新构造格局[J]. 石油学报, 2011, 32(3): 442-449.  
Xu Jie, Zhou Bengang, Ji Fengju et al. A primary study on the neotectonic pattern of the Bohai area in China[J]. Acta Petrolei Sinica, 2011, 32(3): 442-449.
- [15] 徐杰, 计凤桔. 渤海湾盆地构造及其演化[M]. 北京: 地震出版社, 2015: 102-124.  
Xu Jie, Ji Fengju. the Tectonic and its evolution of the Bohai bay basin[M]. Beijing: Seismological Press, 2015: 102-124.
- [16] 徐杰, 宋长青, 楚全芝. 张家口-蓬莱断裂带地震地质特征的初步探讨[J]. 地震地质, 1998, 20(2): 146-154.  
Xu Jie, Song Changqing, Chu Quanzhi. Preliminary study on the seismotectonic characters of the Zhangjiakou-Penglai fault zone[J]. Seismology and Geology, 1998, 20(2): 146-154.
- [17] 李家灵, 晁洪太, 崔昭文, 等. 郯庐活动断层的分段及其大震危险性分析[J]. 地震地质, 1994, 16(2): 122-126.  
Li Jialing, Chao Hongtai, Cui Zhaowen, et al. Segmentation of active fault along the Tancheng-Lujiang fault zone and evaluation of strang Earthquake Risk[J]. Seismology and Geology, 1994, 16(2): 122-126.
- [18] 王华林, 王永光, 刘希强, 等. 渤海及周围地区断裂构造与强震活动研究[J]. 地震研究, 2000, 23(1): 35-43.  
Wang Hualin, Wang Yongguang, Liu Xiqiang et al. Study on fault tectonics and strong seismicity in Bohai and its adjacent regions[J]. Journal of Seismological Research, 2000, 23(1): 35-43.
- [19] 徐杰, 马宗晋, 陈国光, 等. 中国大陆东部新构造期北西向断裂带的初步探讨[J]. 地学前缘, 2003, 10(2): 193-198.  
Xu Jie, Ma Zongjin, Chen Guoguang, et al. NW trending active fault zones of the eastern Chinese continent in neotectonic time[J]. Earth Science Frontiers, 2003, 10(2): 193-198.
- [20] 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[J]. 地震地质, 2007, 29(4): 845-854.  
Xu Jie, Zhang Jin, Zhou Bengang, et al. The newly-generated NE-trending Yellow river estuary-northwest Miao fault zone in southeastern Bohai basin [J]. Seismology and Geology, 2007, 29(4): 845-854
- [21] 徐杰, 冉勇康, 单新建, 等. 渤海海域第四系发育概况[J]. 地震地质, 2004, 26(1): 24-31.  
Xu Jie, Ran Yongkang, Shan Xinjian, et al. Development of the Quaternary system in the Bohai sea area, China[J]. Seismology and Geology, 2004, 26(1): 24-31.

- [22] 邓起东, 张裕明, 环文林, 等. 中国地震烈度区划图编制的原则和方法[J]. 地震学报, 1980, 2(1): 90-110.  
Deng Qidong, Zhang Yuming, Huan Wenlin, et al. Principles and methods of composing the seismic zoning map of China[J]. Acta Seismologica Sinica, 1980, 2(1): 90-110.
- [23] 张力方, 吕悦军, 兰景岩, 等. 空间光滑活动模型在东部海域地震危险性评价中的应用[J]. 地震研究, 2013, 33(3): 342-350.  
Zhang Lifang, Lü Yuejun, Lan Jingyan, et al. Application of spatially smoothing seismic-activity model on seismic hazard estimation in east China off-shore areas[J]. Journal of Seismological Research, 2013, 33(3): 342-350

## Survey and analysis of the geological conditions in trans-sea channel of Bohai strait

ZHAO Tiehu<sup>1,2</sup>, QI Jun<sup>1,2</sup>, MEI Sai<sup>1,2</sup>, GAO Xiaohui<sup>1</sup>, FENG Jing<sup>1</sup>, LI Panfeng<sup>1</sup>

1. Key Laboratory of Marine Hydrocarbon Resources and Environmental Geology, Ministry of Land and Resources, Qingdao Institute of Marine Geology, China Geological Survey, Qingdao 266071, China
2. Laboratory for Marine Mineral Resources, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266071, China

**Abstract** Because the construction of trans-sea channel of Bohai strait is a strategic marine engineering project, a systematic geological and geophysical investigation as well as analysis in the area is fundamental in the early stage of engineering. In this paper, on the basis of existing information and actual survey, seabed topographical features of the Bohai strait are analyzed, the strata lithologic structure since the Neogene is preliminarily investigated, major active faults are identified, a seismicity analysis on Bohai strait and its neighboring area is carried out, and areas of potential seismic source are divided. The results show that erosion scarp, erosion groove and depression, tidal sand ridge, and underwater shoal are the unfavorable factors of the channel construction. The area along the Changdao islands chain is conducive to the undersea tunnel construction for the bedrock buried depth is shallow. The proposed cross-sea channel is located in the potential seismic source area with a maximum magnitude of 6.0-7.0; the main part of the potential seismic source area with 7.0-magnitude is located within Zhangjiakou-Penglai fault zone, where the key seismic fortification for the engineering is.

**Keywords** Bohai strait; trans-sea channel; geological conditions

(责任编辑 刘志远)