

DOI:10.16562/j.cnki.0256-1492.2017.03.010

中国东部海域活动构造定量研究若干问题探讨

陈晓辉^{1,2}, 李日辉^{1,2}

(1. 国土资源部海洋油气资源与环境地质重点实验室, 青岛 266071;
2. 中国地质调查局青岛海洋地质研究所, 青岛 266071)

摘要:晚更新世以来的活动构造与现代地质灾害密切相关,目前针对陆域活动构造的定量研究成果卓著,而在海域方面研究薄弱。本文综述了国内外有关海域活动构造的研究进展,提出了目前国内海域活动构造定量研究存在的主要问题。在研究实践的基础上,阐述了海域活动构造的主要研究方法、其定量研究的关键问题及解决方案,重点总结了海域活动构造区地震危险性定量评价的研究方案,并进一步探讨了海域活动构造自身因素的危险性定量评价的研究思路。

关键词:晚更新世;活动构造;定量研究;东部海域

中图分类号:P736.1

文献标识码:A

文章编号:0256-1492(2017)03-0102-09

本文涉及的活动构造是从工程安全性评价的角度出发,采用邓起东等(2004)^[1]对活动构造的限定,系指晚更新世以来发生过活动、现在正在活动、未来一定时期仍可能发生活动的构造,主要包括断裂、褶皱等。

近 50 年来,我国对陆域活动构造的调查研究取得了很大进步,尤其最近 30 年来,定量活动构造学的发展促进了陆域活动构造危险性评价的长足进步,已基本完成大部分活动构造带的 1:5 万比例尺的地质填图与定量研究,其中“十五”计划期间开展的 20 个大中城市活动断层探测与地震危险性评价研究成果对城市防灾减灾具有重要的指导意义。目前,国内陆域活动构造定量研究方法、地震危险性评价理论与评价模型等方面相对成熟,在陆域中一长期地震预测、地震安全性评价及地震重点监视防御区识别等方面取得了很大的进步。与陆域活动构造相比,海域活动构造由于被水体覆盖不为人们所重视,随着海洋开发的深入,海底活动构造所带来的危害逐步显现出来。这些活动构造与现代地质灾害,尤其是地震、海啸等有着密切的联系,破坏性极大,可造成巨大的人员伤亡和财产损失,是海底灾害地质中最重要的因素之一,这已成为制约我国海洋开发和海洋经济发展的重要因素。海域活动构造的研

究程度直接关系到国家的政治安全、经济安全和沿岸人民的生活及环境,因而对海域构造的活动性及其危险性评价的定量研究是十分重要和迫切的。本文主要根据工作中的体会,分析整合前人的研究成果,对海域晚更新世以来的活动构造定量研究的若干问题进行了探讨。

1 海域活动构造的研究进展

1.1 国外海域活动构造的研究进展

国外有关海底活动构造的研究开展较早,20 世纪 60 年代,美国、苏联、日本等国家相继在其国土及沿海地区相继开展了活动断裂方面的研究,并出版了小比例尺(1:200 万)的活动断裂图集。至 70 年代后期,国外活动断裂的研究进入量化研究时代,涉及的主要研究项目包括“全球主要活动断层研究”项目(1984 年联合国教科文组织的国际地质对比计划)、“World Map of Major Active Faults”项目(1989 年开始),以及“Active Tectonics and Society”研究计划(1995 年开始由美国自然科学基金会资助)等。截至目前,美国、日本等发达国家已基本完成其相关海域活动构造带大比例尺的地质填图及定量研究,部分海域比例尺可达 1:2.5 万。

国外有关海底活动构造的研究程度存在较大的差异性,受生存环境及海洋资源开发利用需求的影响,有关海底活动构造的研究多集中在构造活跃、经济发达的近岸海域,如日本周边海域^[2-6]、土耳其马尔马拉海^[7-14]、地中海^[15,16]、爱琴海^[17-20]、阿尔及利

基金项目:国家自然科学基金项目(41406077);国土资源大调查项目(1212011220113, GZH201500203, GZH201400205, 121201005000150019)

作者简介:陈晓辉(1981—),男,助理研究员,主要从事晚第四纪地层与环境地质研究, E-mail:hongzi1982@163.com

收稿日期:2016-03-11; **改回日期:**2016-08-18. 蔡秋蓉编辑

亚近岸海域^[21]。研究成果主要集中在活动构造的分布特征及其与地震活动的关系方面,研究手段涉及地质地球物理及水下照/摄像等高新技术,研究精度较高,其中采用的浅层地震测线间隔可达 500 m。

1.2 国内海域活动构造的研究进展及存在的主要问题

国内海底活动构造的研究主要集中在经济发达、地震活动强烈的近海海域,主要包括渤海、南黄海、台湾海峡等东部海域(图 1)。与国外相比,国内海域活动构造研究起步较晚。20 世纪 80 年代至 21 世纪初期,国内海域断裂的调查研究主要针对滨海深部断裂,研究成果体现在滨海断裂深部地壳结构的性质及其作用过程方面^[22-25]。

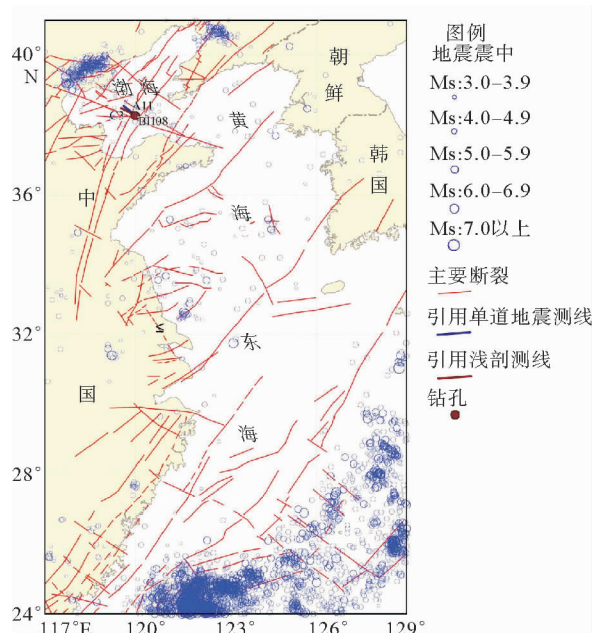


图 1 中国东部海域及周边主要断裂^[26]及地震震中(国家地震科学数据共享中心)

Fig. 1 The major faults^[26] and earthquakes (China Earthquake Data Center) in the eastern China seas and surrounding areas

21 世纪以来,随着核电厂选址及海洋工程开发力度的加大,出于工程位置安全评价的需要,对相关海域进行了活动构造的探测和研究工作,2004 年开始由中国地震局开展的“大城市活动断层探测与地震危险性评价”项目中,对天津、青岛等近岸城市延伸至海域的活动构造开展了调查研究,主要基于浅层地震与钻孔相结合的方法,取得了良好的效果。2004 年国家海洋局开始实施的 908 专项中的“我国陆架灾害地质调查及评价”课题,对陆架区的活动构造进行了定性研究。青岛海洋地质研究所 2011 年启动的“渤海海峡跨海通道工程地壳稳定性评价调

查”项目,主要针对跨海通道工程展开了局部海域的地壳稳定性调查。

近年来,许多学者利用高分辨率声学探测技术(浅地层剖面/单道地震等)在渤海^[27-36]、山东半岛北部近岸^[37]、南黄海近岸^[38]、广西北海近岸^[39]等海域开展了大量的活动构造调查与研究,主要对这些海域活动构造的活动性质及最新活动时间进行了分析,而在渤海海域^[31]进一步定性研究了活动构造与地震活动的关系。

综上所述,前期海域活动构造的研究主要借鉴陆域活动构造的研究方法,成果多集中在活动性及其分布规律方面,针对其危险性评价的研究极为欠缺。与国外及陆域研究相比,目前我国海域活动构造的研究具有较大的差距,主要体现在以下几个方面:

(1) 最新活动时间的厘定并不精准

陆域活动构造最新活动时间主要基于断层泥的年代学分析确定,而海域主要依据地震剖面与钻孔资料的对比分析,由于前期技术手段的限制,缺乏长尺度、高取心率的地质钻孔建立年代地层。

(2) 定量参数的研究程度较低

中国东部海域活动构造的调查研究目前尚处于初始阶段,且仅限于近岸局部海域,有关活动构造几何学、运动学等定量参数的解析不足,涉及较少。

(3) 浅层活动造成因机制的研究薄弱

前期海域资料系统性较差,方法较为单一,虽然采用的浅地层剖面资料的分辨率较高,但深部地层主要依据收集石油部门的地震勘探资料,深浅地层剖面并不重合,从而导致对浅部活动构造的成因机制误判。

(4) 海域活动构造自身因素的定量危险性评价研究欠缺

截止目前,有关活动构造的定量评价研究主要集中在其地震危险性方面,国内海域活动构造的这种评价尚处于起步阶段,且由于海洋工程设施的存在,海域活动构造的危害存在一定的特殊性,针对其自身因素危险性定量评价研究亟需开展,目前国内有关海域活动构造自身因素的定量危险性评价研究未有涉及。

2 中国东部海域活动构造的主要研究方法

学术界针对海域活动构造的研究方法较多,涉及历史文献、地形地貌、地质、地球物理、遥感、水下

照/摄像技术、GPS 变形测量、OBS 观测等^[4,8,9,15,40,41]。目前,中国东部海域活动构造的研究主要基于地质与地球物理相结合的方法。

2.1 海域地球物理测量

海域地球物理测量是研究海底活动构造最常用、最有效的方法^[8,40,41],主要包括海底声学探测与高分辨率浅层地震探测。

海底声学探测主要包括单波束测深、多波束测深与侧扫声纳探测技术,可获得切穿至海底的活动构造及周边精确的地形数据与地貌特征,从而确定活动构造的走向及其性质;而海底地形地貌是海底

活动构造最直接的证据^[4,42,43],如正断层标志性海底台阶,目前国内采用的高分辨率海底声学探测技术水平分辨率可达 1 m。

高分辨率浅层地震探测主要包括高分辨率浅地层剖面测量(图 2)与单道地震测量(图 3),可以提供活动构造的位置、几何学、运动学特征及沉积地层与构造变形之间的关系等相关参数^[9,44]。目前,国内采用的高分辨率浅层地震系统垂向分辨率为优于 1 m(单道地震系统)甚至分米级(浅地层剖面系统),可为海域活动构造定量研究提供精准可靠的技术支持。

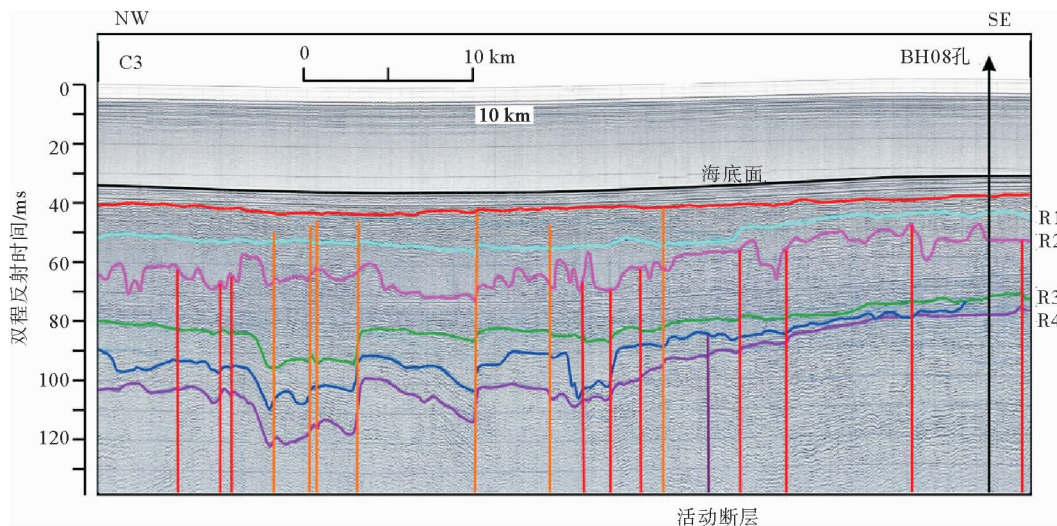


图 2 渤海海域活动断层典型浅地层剖面^[45](剖面位置见图 1)
(R1-全新世底界面;R2-MIS2 期底界面;R3-MIS3 期底界面;R4-MIS4 期底界面)

Fig. 2 The typical shallow seismic profile of active faults in Bohai Sea^[45](see location in Fig. 1)(R1-the bottom boundary of Holocene; R2- the bottom boundary of MIS2; R3- the bottom boundary of MIS3; R4- the bottom boundary of MIS4)

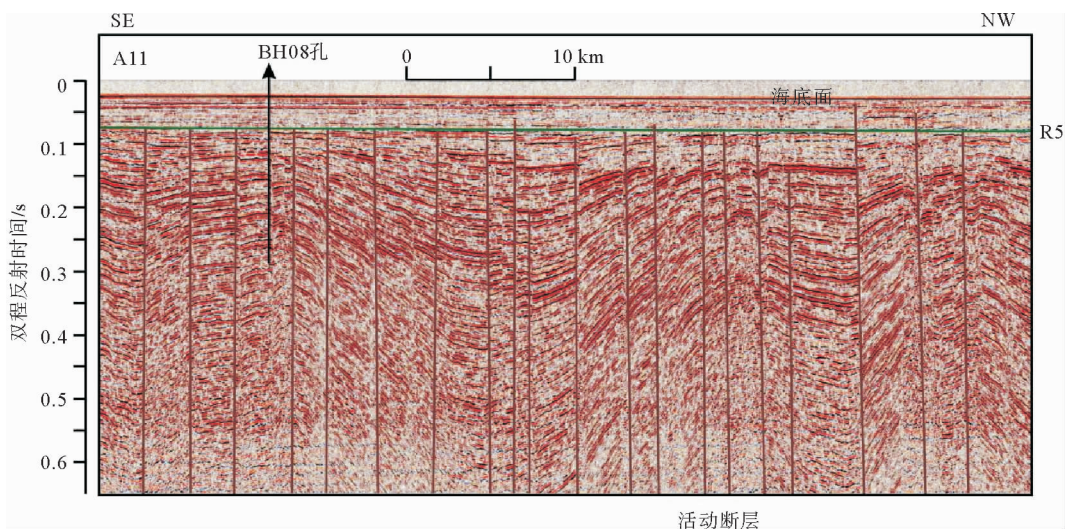


图 3 渤海海域活动断层典型单道地震剖面^[45](剖面位置见图 1)(R5-晚更新世底界面)

Fig. 3 The typical single-channel seismic profile of active faults in Bohai Sea^[45](see location in Fig. 1)(R5-the bottom boundary of MIS5)

2.2 海底浅钻

目前,海底浅钻是确定活动构造活动时代的重要方法,主要通过钻孔的岩性、微体古生物等特征及年代学资料(图 4),结合声学地层的框架建立研究区的年代地层格架,从而揭示活动构造的发育历史^[12]。

AMS¹⁴C 及光释光测年是目前广泛接受的晚更新世以来边缘海高精度地质测年方法,运用两种测年方法相结合,对晚更新世以来的年代地层进行标定进而判断活动构造的最新活动时间是可行、可信的。

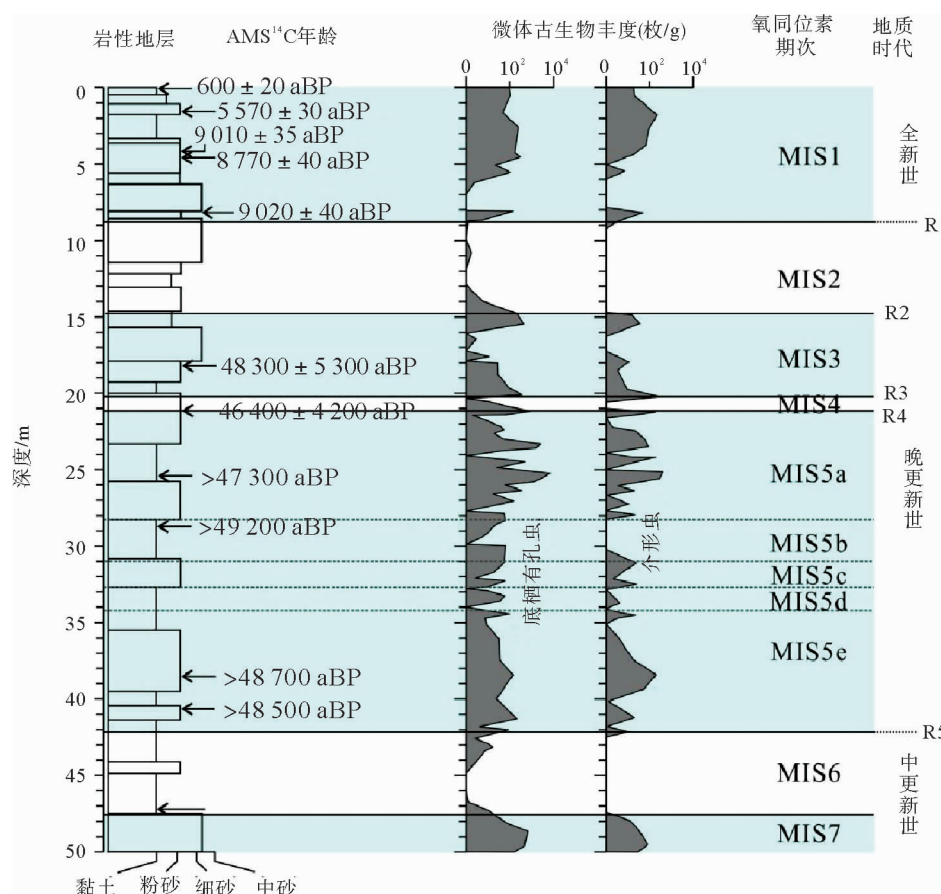


图 4 渤海 BH08 孔上部 50 m 段综合地层划分^[46](钻孔位置见图 1)

(R1-全新世底界面;R2-MIS2 期底界面;R3-MIS3 期底界面;R4-MIS4 期底界面;R5-晚更新世底界面)

Fig. 4 The integrated stratigraphy of the upper 50 m of core BH08 in Bohai Sea^[46](see location in Fig. 1)

(R1-the bottom boundary of Holocene; R2- the bottom boundary of MIS2; R3- the bottom boundary of MIS3;

R4- the bottom boundary of MIS4; R5-the bottom boundary of MIS5)

3 海域活动构造的关键问题及解决方案

3.1 定量参数的获取

海域活动构造定量参数的解析不但是活动构造地质图编制的基础,而且关系到其危险性定量评价的精度及可靠性。这些定量参数主要包括:几何学参数(走向、倾角、长度、分段性、断距、裂度等)、最新活动时间、运动学参数(平均活动速率与活动褶皱的

水平缩短速率与垂向变形速率等)^[1,47]。海域活动构造几何学参数的获取主要基于高分辨率浅层地震精细地质解释;其最新活动时间是利用浅层地震地层中活动构造与地层的对比,通过浅层地震地层与钻孔沉积地层的对比,结合年代学资料(图 2、图 4)来确定;而其运动学参数基于几何学参数与活动时间计算获得。

3.2 活动构造与深部构造的耦合关系

研究表明,中国海域晚更新世以来的活动构造具有明显的继承性^[30,32-35,38],然而其浅部变形位置、

产状等与深部存在一定的差异性,确定成因机制及其深部构造背景也是活动构造研究的关键问题之一。目前主要利用“嵌套式”浅层地震剖面(浅地层剖面与单道地震测量重合)的对比解释,揭示晚更新世以来活动构造与深部构造的耦合关系。需要特别指出的是,目前国家海洋基础地质调查项目已采集了大量的浅地层剖面与单道地震资料,由于研究目的存在差异,大部分海域测线并未重合,在利用这些海域资料进行深-浅构造耦合关系的研究时,需重点对比分析基于两种资料确定的不同时代活动构造的分布特征。

3.3 危险性定量评价

开展危险性定量评价是海域活动构造调查研究的重要内容之一。与陆域活动构造相比,由于海底管线、光缆等设施的存在,海域活动构造破坏性更大,从而使小规模的活动即可造成巨大的损失。因而,对海域活动构造仅开展地震危险性评价是不够的,应对其进行几何学、运动学等自身因素的危险性定量评价。海域活动构造定量评价研究主要包括两个方面:构造区的地震危险性定量评价与构造自身因素危险性定量评价。

3.3.1 活动构造区的地震危险性定量评价

活动构造区地震危险性定量评价方法相对成熟,主要对活动构造区未来发生地震的最大震级、概率及复发周期等定量参数进行估算^[48],其技术流程^[49-51]如下:

(1) 依据确定的海域活动构造几何学、运动学等定量参数,对构造走向与分段呈现明显变化的区段进行活动构造小区划分。

(2) 为了融合现代台网记录与历史地震记录资料,需按照统一时间长度 t 归算各活动构造小区不同震级档 M_i 的地震在其完整记录时段中的理论地震频数 $n_i(M_i)$, 其计算公式^[49]如下:

$$n(M_i)_t = (n_i(M_i)_t \times t) / (T_0 - T_i) \quad (1)$$

式中, T_i 与 T_0 分别为第 M_i 震级档地震记录时段的起止年代, t 为不同震级档地震在频数 $n(M_i)_t$ 统一归算的时间长度,一般统一采用 500 a。

(3) 地震震级与频度的关系($G-R$ 关系)是地震学的基本定律,已广泛应用于地震活动性、地震区划及地震预测研究中^[52-55]。依据最小二乘法拟合出不同活动构造小区震级 $\geq M$ 地震的累积次数 $N(M)$ 之间的关系,估算该关系中与区域有关的经验常数 a_t 和 b , 关系式如下:

$$\lg N_t(M) = a_t - bM \quad (2)$$

式中 $N_t(M)$ 为长度为 t 年的时期内震级 $\geq M$ 地震的累积数。

(4) 目前活动构造区的潜在地震最大震级主要利用 $G-R$ 关系中的两参数比值 a_t/b 来估算。为减少误差,首先采用多项式拟合海域内不同活动构造小区的 $G-R$ 关系参数 a_t/b 与最大地震震级 $M_{\max}$ 关系模型,进而通过该模型反算海域各活动构造小区潜在地震的最大震级。

(5) 海域不同活动构造小区的地震复发间隔由各活动构造小区的地震年发生率 $\lambda(M)$ 与震级 M 的关系^[49]获得,关系式如下:

$$\lg \lambda(M) = a - bM \quad (3)$$

式中 $a = a_t - \lg(t)$ 。

(6) 由于一定时间段内,地震发生的概率与历史地震的时间地点无关,海域各活动构造小区地震的发生可看作松柏泊过程^[54]。活动构造小区未来关注的时间段 ΔT 内至少发生 1 次 $\geq M$ 级地震概率 $P(\Delta T)$ 的关系式如下:

$$P(\Delta T) = 1 - \exp(-\lambda(M) \Delta T) \quad (4)$$

采用公式(3)与(4)可计算出海域不同活动构造小区发生相应震级档地震的平均复发间隔与发震概率。

3.3.2 海域活动构造自身因素的危险性定量评价

目前,中国东部海域活动构造定量评价研究主要针对活动构造的地震危险性定量评价,且研究尚处于起步阶段,对其自身因素造成的危险性定量评价的研究尚未开展,然而后者研究的开展对我国海洋区域资源开发、海上与海岸工程建设和海洋发展战略的制定至关重要。

该评价需解决的关键技术表现在两个方面:危险性评价指标体系的建立与合理数学模型的构建。本文借鉴我国东部海域环境地质因素危险性定量评价的方法^[26,56],充分考虑海域活动构造的特殊性及其规律,初步提出我国东部海域活动构造自身因素危险性定量评价的技术方案。

(1) 依据海底活动构造几何学、运动学等定量参数,进行活动构造的地质填图,充分了解研究海域活动构造的分布特征。

(2) 对研究的海域进行网格化分区,将评价区划分成形状大小相同的网格单元。

(3) 对各网格单元活动构造的不同评价指标进行赋值,评价指标的选取应该遵循客观性、有效性、可操作性等原则,不是所有的参数都要参与评价,需针对海域活动构造的具体特征,选取主要控制参数进行评价。目前海域活动构造自身因素危险性定量

评价尚无通行的标准指标体系,更无先例可借鉴。本文在海域活动构造研究实践的基础上,提出了该评价体系的主要指标(表 1)。

表 1 海域活动构造自身因素危险性定量评价的主要评价指标

Table 1 The main indicators of quantitative risk assessment for marine active tectonics from self-factors in China seas area

评价指标	赋值原则
最新活动时间	由新至老,由大到小的原则
断距	由大至小,由大到小的原则
活动速率	由大至小,由大到小的原则
距活动构造的距离	由近至远,由大到小的原则,借鉴国内外陆域活动构造避让距离的研究成果 ^[57] ,赋值时不但需要分析海域活动构造的自身影响范围,而且需充分考虑海域已经存在的管线、光缆及其他工程设施的分布,对各网格单元科学合理的进行赋值。
.....	

(4) 采用层次分析法^[58]对评价体系中不同评价指标的权重进行判定。

(5) 采用模糊数学综合评价模型对所研究海域活动构造进行自身因素的危险性定量评价。模糊数学作为目前国内外环境地质因素定量评价广泛应用的评价方法,其隶属函数的隶属度可在区间上连续取值,使评价分级具有渐变的特征,更具合理性。

4 结论

晚更新世以来的活动构造与现代地质灾害密切相关,目前国内针对海域活动构造的定量研究尚处于起步阶段。近年来,随着国家海洋基础地质调查的广泛开展,在我国东部海域采集了大量的浅层地震资料(1:100 万比例尺网度全覆盖、1:25 万比例尺网度部分海域全覆盖),且基于钻孔与浅地层剖面对比研究的海域晚第四纪以来的年代地层格架已基本厘定,这些数据成果将为东部海域活动构造的定量研究提供良好的资料基础。

本文对海域活动构造研究的若干问题进行了归纳和讨论,目的不仅在于介绍海域活动构造的研究方法与内容,而是在实践工作的基础上,总结了目前国内海域活动构造定量研究最实用的研究方法、关键问题及解决方案,并着重归纳了海域活动构造地

震危险性定量评价研究方案,探讨了海域活动构造自身因素的危险性定量评价研究思路,以期促进我国东部海域活动构造的定量研究。

参考文献(References)

- [1] 邓起东,陈立春,冉勇康. 活动构造定量研究与应用[J]. 地学前缘, 2004, 11(4): 383-392. [DENG Qidong, CHEN Lichun, RAN Yongkang. Quantitative studies and applications of active tectonics[J]. Earth Science Frontiers, 2004, 11(4): 383-392.]
- [2] Momma H, Kawaguchi K, Iwase R, et al. Seabeam and deep tow surveys off Hatsushima Island after 1997 earthquake swarm east of Izu Peninsula[J]. Journal of Deep-Sea Research, 1997, 13: 375-393.
- [3] Nanayama F, Ikeda M, Otsuka K, et al. Regional imaging and segmentation of the MTL active fault system in the Iyo-nada sea-off saganoseki area[J]. Annual Report on Active Fault and Paleoeearthquake Researches, 2002, 2: 141-152.
- [4] Itoh Y, Tsutsumi H, Yamamoto N, et al. Active right-lateral strike-slip fault zone along the southern margin of the Japan Sea[J]. Tectonophysics, 2002, 351(4): 301-314.
- [5] Okamura Y, Satake K, Ikehara K, et al. Paleoseismology of deep-sea faults based on marine surveys of northern Okushiri ridge in the Japan Sea[J]. Journal of Geophysical Research, 2005, 110(B5): B09105, doi: 10.1029/2004JB003135.
- [6] Ishiyama T, Sato H, Abe S, et al. High-resolution 3D seismic reflection imaging across active faults and its impact on seismic hazard estimation in the Tokyo metropolitan area[J]. Tectonophysics, 2016, 689: 79-88, doi: 10.1016/j.tecto.2016.01.042.
- [7] Ambraseys N N, Finkel C F. Long-term seismicity of Istanbul and of the Marmara Sea region[J]. Terra Nova, 1991, 3(5): 527-539.
- [8] Okay A I, Kaşllar-Özcan A, İmren C, et al. Active faults and evolving strike-slip basins in the Marmara Sea, northwest Turkey: A multichannel seismic reflection study[J]. Tectonophysics, 2000, 312(2): 189-218.
- [9] Kuşçu, Okamura M, Matsuoka H, et al. Active faults in the Gulf of İzmit on the North Anatolian Fault, NW Turkey: a high-resolution shallow seismic study[J]. Marine Geology, 2002, 190(1-2): 421-443.
- [10] Le Pichon X, Chamot-Rooke N, Rangin C, et al. The North Anatolian fault in the Sea of Marmara[J]. Journal of Geophysical Research, 2003, 108(B4): 2179, doi: 10.1029/2002JB001862.
- [11] Flerit F, Armijo R, King G C P, et al. Slip partitioning in the Sea of Marmara Pull-Apart determined from GPS velocity vectors[J]. Geophysical Journal International, 2003, 154(1): 1-7.
- [12] 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[J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2005, 6(6): Q06009, doi: 10.1029/2004GC000896.
- [13] Muller J R, Aydin A. Using mechanical modeling to constrain fault geometries proposed for the northern Marmara Sea[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2005, 110(B3): B03407, doi: 10.1029/2004JB003226.
- [14] Mchugh C M G, Braudy N, Çağatay M N, et al. Seafloor fault ruptures along the North Anatolia Fault in the Marmara Sea, Turkey: Link with the adjacent basin turbidite record[J]. *Marine Geology*, 2014, 353: 65-83.
- [15] Alvarez-Marrón J. Pliocene to Holocene structure of the eastern Alboran Sea (Western Mediterranean)[M]//Zahn R, Comas M C, Klaus A. *Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results*. College Station, TX: ODP, 1999, 161: 145-156.
- [16] Haughton P. Contained turbidites used to track sea bed deformation and basin migration, Sorbas Basin, south-east Spain[J]. *Basin Research*, 2001, 13(2): 117-139.
- [17] Nalbant S S, Hubert A, King G C P. Stress coupling between earthquakes in northwest Turkey and the North Aegean Sea[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1998, 103(B10): 24469-24486.
- [18] Saatçilar R, Ergintav S, Demirbağ E, et al. Character of active faulting in the North Aegean Sea[J]. *Marine Geology*, 1999, 160(3-4): 339-353.
- [19] Kurt H, Demirbağ E, Kusu İ. Active submarine tectonism and formation of the Gulf of Saros, Northeast Aegean Sea, inferred from multi-channel seismic reflection data[J]. *Marine Geology*, 2000, 165(1-4): 13-26.
- [20] Piper D J W, Perissoratis C. Quaternary neotectonics of the South Aegean arc[J]. *Marine Geology*, 2003, 198(3-4): 259-288.
- [21] Déverchère J, Yelles K, Domzig A, et al. Active thrust faulting offshore Boumerdes, Algeria, and its relations to the 2003 Mw 6.9 earthquake[J]. *Geophysical Research Letters*, 2005, 32: L04311.
- [22] 廖其林, 王振明, 王屏路, 等. 福州-泉州-汕头地区地壳结构的爆炸地震研究[J]. *地球物理学报*, 1988, 31(3): 270-280. [LIAO Qilin, WANG Zhenming, WANG Pinglu, et al. Explosion seismic study of the crustal structure in Fuzhou-Quanzhou-Shantou region[J]. *Acta Geophysica Sinica*, 1988, 31(3): 270-280.]
- [23] 姚伯初, 曾维军, 陈艺中, 等. 南海北部陆缘东部的地壳结构[J]. *地球物理学报*, 1994, 37(1): 27-35. [YAO Bochu, ZENG Weijun, CHEN Yizhong, et al. The crustal structure in the eastern part of the northern margin of the South China Sea[J]. *Acta Geophysica Sinica*, 1994, 37(1): 27-35.]
- [24] Yan P, Zhou D, Liu Z S. A crustal structure profile across the northern continental margin of the south China sea[J]. *Tectonophysics*, 2001, 338(1): 1-21.
- [25] 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 on-shore-offshore seismic profile across the Binhai (Littoral) Fault Zone in northeastern South China Sea[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2004, 47(5): 845-852.]
- [26] 李培英, 杜军, 刘乐军, 等. 中国海岸带灾害地质特征及评价[M]. 北京: 海洋出版社, 2007. [LI Peiying, DU Jun, LIU Lejun, et al. *Characteristics and Evaluation of Hazard Geology in Coastal Zone of China*[M]. Beijing: China Ocean Press, 2007.]
- [27] 胡政, 丁东. 渤海地震震中附近地区浅层地质构造特征[J]. *地震学刊*, 1990(3): 26-32. [HU Zheng, DING Dong. The characteristics of the shallow geological structure in the adjacent region of the epicenter of the Bohai Sea earthquake[J]. *Journal of Seismology*, 1990(3): 26-32.]
- [28] 赵根模, 赵国敏, 杨港生, 等. 声波探测显示的渤海湾西部全新世断层活动[J]. *中国地震*, 2005, 21(2): 139-146. [ZHAO Genmo, ZHAO Guomin, YANG Gangsheng, et al. The Holocene active fault in the western part of Bohai Gulf showed by acoustic sounding[J]. *Earthquake Research in China*, 2005, 21(2): 139-146.]
- [29] 郑彦鹏, 王勇, 陈宇坤, 等. 天津塘沽地区海河断裂的浅部构造特征[J]. *海洋科学进展*, 2006, 24(3): 307-313. [ZHENG Yanpeng, WANG Yong, CHEN Yukun, et al. Shallow tectonic characteristics of the Haihe Fault in Tanggu Area, Tianjin municipality[J]. *Advances in Marine Science*, 2006, 24(3): 307-313.]
- [30] 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.]
- [31] 李西双, 裴彦良, 刘保华, 等. 1969年渤海 $M_s 7.4$ 地震发震断层的声学探测[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 $M_s 7.4$ earthquake in Bohai Sea[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2009, 52(9): 2291-2301.]
- [32] 李西双, 刘保华, 华清峰, 等. 张家口-蓬莱断裂带渤海段晚第四纪活动特征[J]. *海洋科学进展*, 2009, 27(3): 332-341. [LI Xishuang, LIU Baohua, HUA Qingfeng, et al. Characters of the Zhangjiakou-Penglai Fault Zone activity in the Bohai Sea since Late Quaternary[J]. *Advances in Marine Science*, 2009, 27(3): 332-341.]
- [33] 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(8): 684-692. [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.]
- [34] 李西双, 刘保华, 赵月霞, 等. 渤海海域晚更新世-全新世的活动构造[J]. *海洋学报*, 2010, 32(5): 52-59. [LI Xishuang, LIU Baohua, ZHAO Yuexia, et al. Late Pleisto-

- cene-Holocene submarine active structures in the Bohai Sea [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2010, 32(5): 52-59.]
- [35] 王洪聚, 刘保华, 李西双. 晚更新世以来渤海南部海域断裂活动性[J]. *地球科学进展*, 2011, 26(5): 556-564. [WANG Hongju, LIU Baohua, LI Xishuang. Activity of the faults in the southern part of Bohai Sea since the Late Pleistocene[J]. *Advances in Earth Science*, 2011, 26(5): 556-564.]
- [36] Zhu G, Hu W, Song L H, et al. Quaternary activity along the Tan-Lu fault zone in the Bohai Bay, East China: Evidence from seismic profiles[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2015, 114: 5-17.
- [37] 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.]
- [38] 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.]
- [39] 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(2): 20-24. [MA Shengzhong. Application of shallow geophysical method to detect active fault in nearshore of Qingzhou Bay-Beihai[J]. *Ocean Technology*, 2010, 29(2): 20-24.]
- [40] Demirbağ E, Rangin C, Le Pichon X, et al. Investigation of the tectonics of the Main Marmara Fault by means of deep-towed seismic data[J]. *Tectonophysics*, 2003, 361(1-2): 1-19.
- [41] 李西双, 刘保华, 赵月霞, 等. 海底活动断裂研究方法及我国近海活动断裂研究[J]. *海洋地质动态*, 2008, 24(3): 8-13. [LI Xishuang, LIU Baohua, ZHAO Yuexia, et al. Methodology for research of seabed activity fracture and research on paralic activity fracture in China[J]. *Marine Geology Letters*, 2008, 24(3): 8-13.]
- [42] İmren C, Le Pichon X, Rangin C, et al. The North Anatolian fault within the Sea of Marmara: a new interpretation based on multi-channel seismic and multi-beam bathymetry data[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2001, 186(2): 143-158.
- [43] Gazioğlu C, Gökasan E, Algan O, et al. Morphologic features of the Marmara Sea from multi-beam data[J]. *Marine Geology*, 2002, 190(1-2): 397-420.
- [44] Yaltırak C, Alpar B. Evolution of the middle strand of north Anatolian Fault and shallow seismic investigation of the southeastern Marmara Sea (Gemlik bay)[J]. *Marine Geology*, 2002, 190(1-2): 307-327.
- [45] 青岛海洋地质研究所. 1:100 万天津幅海洋区域地质调查报告[R]. 2015. [Qingdao Institute of Marine Geology. 1:1000000 Tianjin Marine Geological Survey Report [R]. 2015.]
- [46] 李小艳, 赵泉鸿, 姚政权, 等. 渤海百万年以来的海侵记录: BH08 孔有孔虫和介形类证据[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2015, 35(6): 93-108. [LI Xiaoyan, ZHAO Quanhong, YAO Zhengquan, et al. Transgressive records of last million years in the Bohai Sea, China: evidence from Foraminifera and Ostracoda of core BH08[J]. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 2015, 35(6): 93-108.]
- [47] 邓起东, 闻学泽. 活动构造研究—历史、进展与建议[J]. *地震地质*, 2008, 30(1): 1-30. [DENG Qidong, WEN Xueze. A review on the research of active tectonics—history, progress and suggestions[J]. *Seismology and Geology*, 2008, 30(1): 1-30.]
- [48] 邓起东. 城市活动断裂探测和地震危险性评价问题[J]. *地震地质*, 2002, 24(4): 601-605. [DENG Qidong. Exploration and seismic hazard assessment of active faults in urban areas[J]. *Seismology and Geology*, 2002, 24(4): 601-605.]
- [49] 闻学泽, 徐锡伟, 龙锋, 等. 中国大陆东部中—弱活动断层潜在地震最大震级评估的震级—频度关系模型[J]. *地震地质*, 2007, 29(2): 236-253. [WEN Xueze, XU Xiwei, LONG Feng, et al. Frequency-magnitude relationship models for assessment of maximum magnitudes of potential earthquakes on moderately and weakly active faults in eastern China mainland[J]. *Seismology and Geology*, 2007, 29(2): 236-253.]
- [50] 陈宇坤, 刘芳, 袁盾, 等. 天津地区隐伏断裂地震危险性定量评价[J]. *地震地质*, 2010, 32(1): 138-149. [CHEN Yukun, LIU Fang, YUAN Dun, et al. Seismic risk quantitative evaluation on blind faults in Tianjin area[J]. *Seismology and Geology*, 2010, 32(1): 138-149.]
- [51] 刘红艳, 陈宇坤, 闫成国, 等. 天津近海海域隐伏断裂地震危险性评价[J]. *震灾防御技术*, 2013, 8(2): 146-155. [LIU Hongyan, CHEN Yukun, YAN Chengguo, et al. Seismic risk evaluation on blind faults in Tianjin offshore areas[J]. *Technology for Earthquake Disaster Prevention*, 2013, 8(2): 146-155.]
- [52] Gutenberg B, Richter C F. Magnitude and energy of earthquakes[J]. *Annali di Geofisica*, 1956, 9: 1-15.
- [53] Mogi K. Magnitude-frequency relation for elastic shocks accompanying fractures of various materials and some related problems in earthquakes[J]. *Bulletin of the Earthquake Research Institute, University of Tokyo*, 1962, 40(4): 831-853.
- [54] Cornell C A. Engineering seismic risk analysis[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1968, 58(5): 1583-1606.
- [55] Wyss M, Wiemer S. Change in the probability for earthquakes in southern California due to the landers magnitude 7.3 earthquake[J]. *Science*, 2000, 290(5495): 1334-1338.
- [56] 青岛海洋地质研究所. 1:100 万大连幅海洋区域地质调查报告[R]. 2013. [Qingdao Institute of Marine Geology. 1:1000000 Dalian Marine Geological Survey Report [R]. 2013.]

2013.]
- [57] 张建毅, 薄景山, 袁一凡, 等. 活动断层及其避让距离研究综述[J]. 自然灾害学报, 2012, 21(2): 9-18. [ZHANG Jianyi, BO Jingshan, YUAN Yifan, et al. Review of research on active fault and its setback[J]. Journal of Natural Disasters, 2012, 21(2): 9-18.]
- [58] 陆雍森. 环境评价[M]. 上海: 同济大学出版社, 1990. [LU Yongsen. Environment Assessment[M]. Shanghai: Tongji University Press, 1990.]

A REVIEW ON QUANTITATIVE STUDIES OF ACTIVE TECTONICS IN EASTERN CHINA SEAS

CHEN Xiaohui^{1,2}, LI Rihui^{1,2}

(1. Key Laboratory of Marine Hydrocarbon Resources and Environmental Geology, Ministry of Land and Resources, Qingdao 266071; 2. Qingdao Institute of Marine Geology, Qingdao 266071)

Abstract: Many kinds of modern geo-hazards are closely related to the active tectonic movement since Pleistocene. Many quantitative researches have been devoted to the active tectonics on land, but seldom in the sea. This paper presents a review on progresses of the research on marine active tectonics in China and some other countries, in which, we made a review of the main problems encountered recently in quantitative studies of active tectonics in the sea area of China, and discussed the main methods for study of marine active tectonics, as well as the key issues for quantitative research and solutions based on the practice in recent years. Emphasis is put on the research schemes for the quantitative risk assessment on potential earthquake in the tectonically active region. Further, the paper discussed the way of thinking for quantitative risk assessment of marine active tectonics from self-factors of China seas.

Key words: Pleistocene; active tectonics; quantitative research; eastern China seas