

天津近海海域隐伏断裂地震危险性评价¹

刘红艳 陈宇坤 闫成国 杨菲

(天津市地震局, 天津 300201)

摘要 以天津市近海海域断裂探测资料为基础, 通过对海河断裂海域段和海一断裂的地质构造、第四纪活动性、深部构造、构造应力场与形变场以及地震活动性等的研究, 综合判定了海河断裂海域段和海一断裂的活动性与构造特征。利用地震地质、历史与现今地震活动性资料, 建立了按 500a 归算的震级—频度关系模型, 根据天津地区的最大震级上限 M_0 与 a/b 的关系, 计算出了海河断裂海域段和海一断裂的最大震级。采用泊松概率模型, 估算出了海河断裂海域段和海一断裂未来 50—200a 发生地震的最大震级、发生概率以及复发周期等定量参数。

关键词: 地震危险性 定量评价 断层小区 震级—频度关系 最大震级 发震概率 复发周期

引言

天津近海海域位于北东向的河北平原断裂带和北西向的张家口—渤海断裂带的交汇部位。区内基底断层纵横交错, 各断裂活动时代、活动性质不清、各断裂的几何学特征、运动学特征及相互之间的切割关系、断层分段、地震活动性、地震危险程度等均有待于进一步查明。因此探明天津近海海域断层的空间位置、延伸范围、活动时代及强度, 科学评价其地震危险性和断层活动影响范围, 对天津及滨海新区区域经济发展、城市规划、市政建设、工业布局及人民的生命财产安全等具有重要意义。

天津近海隐伏断层探测的目标区范围是总面积 1000—1400km² 的天津近海海域, 北起天津新港北, 南至歧口, 长约 40km, 东西向为沿海岸线向海上方向延伸 25—35km。跨越的地质构造单元主要有塘沽鼻状凸起、板桥凹陷和歧口凹陷等。探测的目标断层主要为海河断裂(海域段)、歧北断裂、歧中断裂、海一断裂及其分支断裂等(图 1)。

而歧北、歧中断裂是歧口凹陷内部的次级断裂, 水上声纳及钻孔勘探结果都表明歧北断裂、歧中断裂的分支断裂众多, 这些断裂虽然上断点埋深较浅, 断错了晚更新世中期地层, 但是相对于海一断裂、海河断裂等大型断裂来讲, 其规模、活动强度都要小的多, 虽然歧北、歧中断裂对新生代地层有一定的控制作用, 但控制作用十分有限, 是海河断裂、海一断裂的派

1 基金项目 天津市“十一五”地震安全基础工程(津发改投资【2009】1230号)、天津市地震局青年基金(编号 0905)和天津市科技兴海项目(KJXH2012-30)联合资助

[收稿日期] 2013-01-10

[作者简介] 刘红艳, 女, 生于 1983 年。工程师。2008 年 7 月于中国科学院地质与地球物理研究所获得硕士学位, 现在天津市地震灾害防御中心工作。主要从事地震活动性和工程地震的研究等工作。E-mail: liuhongyan_012@163.com

生断裂，中深层地震剖面显示歧北断裂、歧中断裂在深部都归并到海河断裂、海一断裂上。

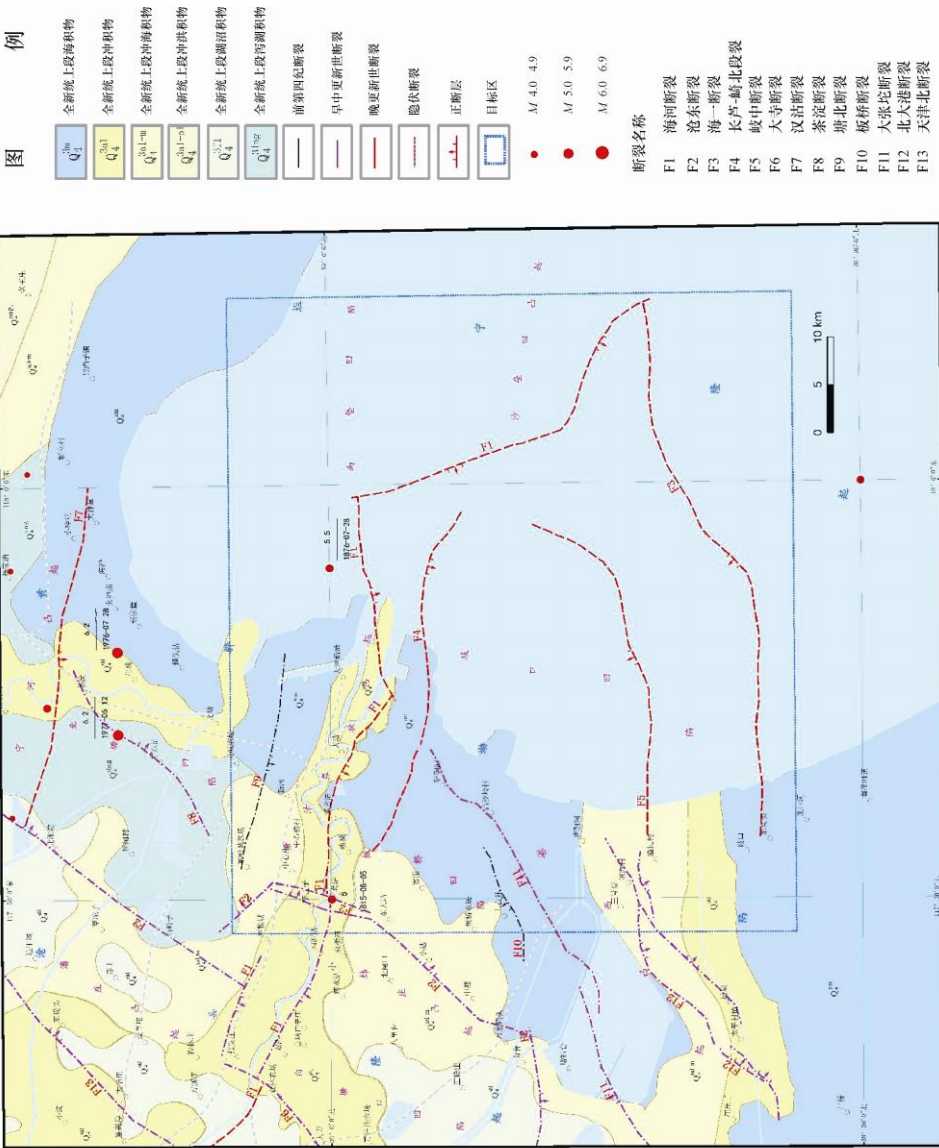


图 1 1:25 万天津近海海域地震构造图
Fig.1 Seismo-tectonic map of Tianjin offshore area

综合地层柱状剖面图

字	界系	岩性	厚度 m	统	
显	第四系	Q ₄	19	全新统	
		Q ₃	51	上更新统	
		Q ₂	122	中更新统	
		Q ₁	206	下更新统	
	新生界	N ₂	1074	下渐新统	
		N ₁	158	中新统	
	生	古近系	E ₅	2106	渐新统
			E ₄	692	始新统
			E ₃	816	下白垩统
			J	1071	侏罗统
中生界		T ₂	219	中二叠统	
		T ₁	433	下二叠统	
古		二叠系	P ₁	506	上二叠统
			P ₂	1062	下二叠统
		石炭系	C ₂	100	中石炭统
			C ₁	100	下石炭统
	奥陶系	O ₂	100	中奥陶统	
		O ₁	100	下奥陶统	
	寒武系	O ₄	242	上寒武统	
		O ₃	276	中寒武统	
		O ₂	324	下寒武统	
		O ₁	301	下寒武统	
元	古	奥	4500		
古	长	O ₁	4159		
		Ar	2250		
太	古	界系			

因此, 作者认为歧北断裂、歧中断裂不是地震断层, 也不具有发生中强地震的条件和背景, 该断裂的地震危险性可参照《中国地震动参数区划图(GB 18306-2001)》潜在震源划分方案中本地区的本底地震, 即其潜在地震的最大震级为 $M_5.5$ 级。因此, 本文只对海河断裂海域段、海一断裂进行地震危险性评价。对其未来的地震危险区段进行划分, 确定潜在地震的最大震级和发震概率。

本文基于对上述断层的几何结构、活动性分段、历史地震破坏区展布、现今地震展布、地球物理场、深浅构造关系、构造应力场与形变场特征的研究, 通过构造类比和历史地震分析, 确定断层未来潜在地震危险区段。首先从地质上对未来地震的强度(大小)和发震危险程度进行判定, 然后进行工作区和各断层的地震活动性研究。采用拟合出的天津地区的 $a/b - M_0$ 经验关系, 进行天津近海海域断层地震危险性的定量评价。

1 海河断裂海域段的构造变形特征

1.1 海河断裂(海域段)几何结构特征

海河断裂海域段西起天津临港工业区, 呈北东东方向向东延伸 22km 后, 又转为北西西向, 全长 55km。海河断裂是塘沽鼻状凸起与歧口凹陷的分界断裂, 控制了歧口凹陷的沉积发育历史。断裂倾向南, 倾角约 $60^\circ - 70^\circ$, 在地震剖面上表现为上陡下缓、凹面向上的铲式正断层, 其浅部存在多条分支断裂, 主断层面向下构成主滑脱面, 各分支断层逐渐趋向于该滑脱面。各分支断层与主断层形成“Y”字形的地堑式构造。

1.2 海河断裂海域段活动特征

根据钻孔勘探与地层对比结果, 综合水上声纳探测结果, 海河断裂海域段的最浅上断点埋深为 22.7m, 断距在 6.9m 左右。结合该地区的年代地层学研究, 以及钻孔样品的年代学测试分析, 海河断裂海域段的最新活动时代至少为晚更新世晚期。

1.3 海河断裂海域段地震活动特征

1976年7月28日唐山地震发生当天, 在天津塘沽地区的渤海近岸海域发生了1次 $M_5.5$ ($M_L 5.8$) 级地震, 这表明海河断裂东段有发生中强地震的可能, 该区的地震活动水平较强。

1.4 海河断裂海域段的深部构造特征

通过对大地电磁测深剖面 and 深地震宽角度折/反射探测及深部构造的分析, 认为海河断裂海域段同华北地区一样, 普遍具有独特的深部构造组合: 地壳浅部存在铲状正断裂, 在 6—8km 的深度逐渐消失, 没有再向下延伸; 在中地壳发育有高角度以平移活动为主的深部断裂, 该深部断裂与地壳浅部断裂汇而不交, 中间以低速层分隔; 中地壳下部或下地壳上部发育高导层或低速层。另外, 本区域位于渤海西部上地幔隆起西边缘, 该区处于地壳厚度变化梯度带, 地壳厚度自东向西从 28km 变为了 32km。这些构造组合在一起, 构成地震发生的深部构造条件。根据有效剪应力模拟计算, 在 10—15km 深度的中地壳高导层和低速层之间, 往往会形成有效剪应力正值区, 具有较大的中强地震危险性。

1.5 现今地壳形变特征

海河断裂海域段总体走向北西西, 区域构造应力场方向为北东东向挤压, 二者具有一定的交角, 存在积累较强正应力的可能, 断层面强度中等, 近年来受华北地区一系列地震和断层相互作用的影响, 具有较强的中强地震危险性。

1.6 海河断裂海域段地震危险性

综合上述对海河断裂海域段构造变形特征、断层活动特征、地震活动、深部构造条件、现

今地壳变形与形变特征等，考虑华北地区地震孕育发生的特点，按照构造类比的原则与方法，认为海河断裂海域段最新活动时代至少为晚更新世晚期，具有发生中强地震的可能。

2 海一断裂的地震构造变形特征

2.1 海一断裂的构造变形特征

海一断裂是控制黄骅拗陷内次级构造单元歧口凹陷的边界断裂，与海河断裂共同控制了歧口凹陷的沉积发育历史。该断裂西起沙井子水库南侧，向东逐渐进入海域，走向北东-北东，倾向北西，长约 55km，为西北盘下降的正断层。该断裂控制了歧口凹陷中、新生代的沉积发育历史，是长期继承性发育的主干断裂。新近纪以来该断裂活动强烈，断陷区新生代最大沉积厚度超过 10000m。

海一断裂倾角比较陡，浅部存在多条分支断裂，共同组成花状构造，呈复式地堑结构，并向上部散开，分支断裂大致在深度方向 3km 左右逐渐归并。在地震剖面上，海一断裂明显断错了新近系明化镇组、馆陶组、古近系东营组、沙河街组、中生界及古生界奥陶系地层。

2.2 海一断裂的活动特征

根据钻孔勘探与地层对比结果，海一断裂的最浅上断点埋深为 36.9m，断距在 4.5m 左右，结合该地区的年代地层学研究，以及钻孔样品的年代学测试分析，海河断裂海域段的最新活动时代为晚更新世早期。海一断裂规模较大，活动性较强，具备发生中强以上地震的危险性。

2.3 海一断裂的地震活动特征

由于海域地震监测能力较低，地震记录缺失比较多，历史上 1624 年 2 月 1 日和 1624 年 4 月 19 日在渤海海域发生 2 次 $M_S 5 \frac{1}{2}$ 级地震，这 2 次地震有可能是海一断裂活动引起的，这表明海河断裂东段有发生中强地震的可能，该区的地震活动水平较强。

2.4 海一断裂的深部构造特征

通过对大地电磁测深剖面 and 深地震宽角度折/反射探测及深部构造的分析，认为海一断裂同华北地区一样，普遍具有独特的深部构造组合：地壳浅部存在铲状正断裂，在 6—8km 的深度逐渐消失，没有再向下延伸；在中地壳发育有高角度以平移活动为主的深部断裂，该深部断裂与地壳浅部断裂汇而不交，中间以低速层分隔；中地壳下部或下地壳上部发育高导层或低速层。另外，本区域位于渤海西部上地幔隆起西边缘，该区处于地壳厚度变化梯度带，地壳厚度自东向西从 28km 变为了 32km。这些构造组合在一起，构成地震发生的深部构造条件。根据有效剪应力模拟计算，在 10—15km 深度的中地壳高导层和低速层之间，往往会形成有效剪应力正值区，具有较大的中强地震危险性。

2.5 现今地壳形变特征

海一断裂总体走向为北东-北东，区域构造应力场方向为北东-北东向挤压，二者交角较小，不会积累较大的正应力，断层面强度较小，但近年来受华北地区一系列地震和断层相互作用的影响，存在发生中强地震的危险性。

2.6 海一断裂地震危险性

综合上述对海一断裂的构造变形特征、断层活动特征、地震活动、深部构造条件、现今地壳变形与形变特征等，考虑华北地区地震孕育发生的特点，按照构造类比的原则与方法，认为海一断裂控制了歧口凹陷中、新生代的沉积发育历史，是长期继承性发育的主干断裂。

新近纪以来该断裂活动强烈，其最新活动时代已达晚更新世早期，具有发生中强地震的可能。

3 潜在地震最大震级评价方法

海河断裂海域段、海一断裂的地震危险性评价方法参照闻学泽等（2007）对中国东部中—弱活动断层地震危险性评价的研究方法：首先划分本地区的断层小区，统计断层小区各震级档归算到统一时间长度后的地震累积频度，拟合震级 M 与累积频 $\lg N(m)$ 的关系；震级 M 与累积频度 $\lg N(m)$ 关系 ($\lg N(m) = a - bm$) 中的 a 、 b 值及 a/b 值可以用来估计研究区特定时段内的最大地震期望震级，也称为“最大截距震级”。

海河断裂海域段、海一断裂均属于晚更新世断层，二者均无全新世以来的活动证据，属于典型的中国东部中强活动断层，其构造变形特征、深部构造背景及其与历史地震活动关系等方面表明，二者均具有发生中强地震的构造条件，只是由于目前的探测技术尚不能获得它们确切的断层活动性参数。基于这些考虑，本文采用在天津地区隐伏断裂地震危险性定量评价的经验与成果（陈宇坤等，2010），根据其拟合出的天津地区的 $a/b - M_u$ 经验关系（式 1），从而计算估计海河断裂海域段、海一断裂潜在地震的最大震级。

$$M_u = -2.7917 + 1.3543\left(\frac{a_i}{b}\right) + 0.0134\left(\frac{a_i}{b}\right)^2 \quad (1)$$

$$(n=6, R=0.997, \sigma=0.316, 3.7 \leq a_i/b < 7.4)$$

根据工作区主要断层的空间位置、断层活动、分段特征等，考虑以往本地区潜在震源的划分情况，对断裂沿走向有明显变化或有明显分段标志的分段划分断层小区，共划分了 20 个断层小区，5 为海河断裂海域段的断层小区，20 为海一断裂的断层小区，见图 2。

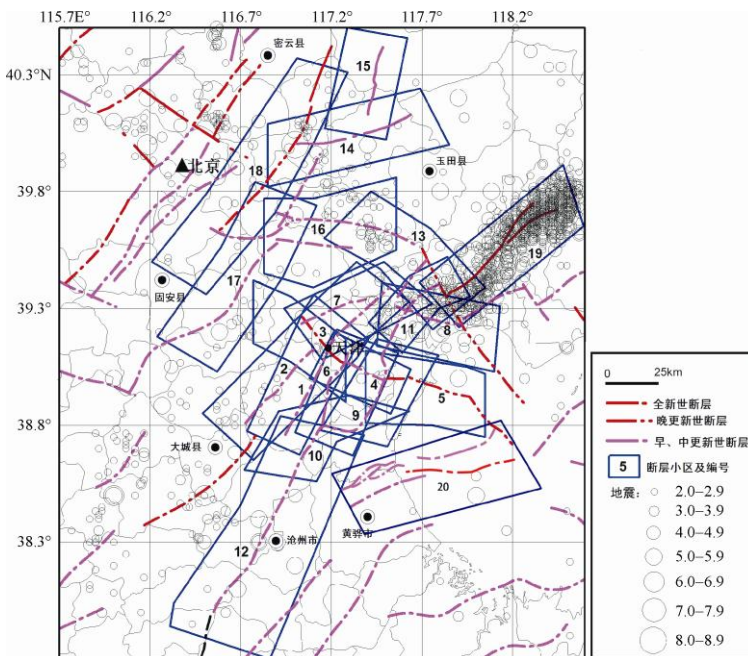


图 2 工作区断层小区划分图（陈宇坤等，2010 修改）

Fig.2 Active fault distribution of the study area (after Chen, 2010)

4 海河断裂海域段、海一断裂的地震危险性评价

4.1 潜在地震的最大震级评估

华北地区是中国文化发展最早的地区之一，地震史料记载比较长，地震资料的完整性和可靠性相对较好，自 1484 年以来 $M_S \geq 4 \frac{3}{4}$ 以上地震基本没有遗漏。天津地区自 1345 年以来 4 级以上地震基本无遗漏；1960 年以来 3.0 级以上地震基本无遗漏；1970 年以来 2.0 级以上地震基本无遗漏（黄玮琼等，1994a；1994b）。

由于渤海海域地震监测能力有限，地震目录可能有遗漏，因此本文选取了 1980 年以来的小震目录，利用震级转换公式 $M_S = 1.13M_L - 1.08$ （国家地震局震害防御司，1990），将地方震级 M_L 统一换算成面波震级 M_S ，取震级分档间距 0.3。与 1484 年以来有历史记载以来的强震目录合并，将各断层小区各震级档的地震目录按照 500a 的统一时间长度进行归算，其计算公式为（闻学泽等，2007）：

$$n(M_i)_t = \frac{n_i(M_i) \times t}{(T_0 - T_i)} \quad (2)$$

式中， T_i 和 T_0 分别是第 M_i 震级档地震的完整记录时段的起止年代，其中 T_0 统一取 2012，即最晚地震资料至 2011 年年底； T_i 则依据不同断层小区，不同震级范围地震的完整记录时段的不同而变化； t 则是不同震级档地震频数 $n(M_i)$ 统一归算的时段长度，这里统一取 500a。

用最小二乘法拟合出它们的 G—R 关系，给出其 G—R 关系参数及其历史最大震级。

根据式（2），将海河断裂海域段断层小区选取的地震目录统一归算到 500a，再由 G—R 关系拟合海河断裂海域段的断层小区的震级—频度关系为：

$$\lg N_i(M_S) = 2.73 - 0.42M_S \quad (3)$$

图 3 给出了海河断裂海域段断层小区震级—频度关系图。由式（3）得出海河断裂海域段的 a_i/b 值为 6.65，根据拟合公式（1）估算，海河断裂海域段的潜在地震的最大震级 M_u 为 6.8 级。

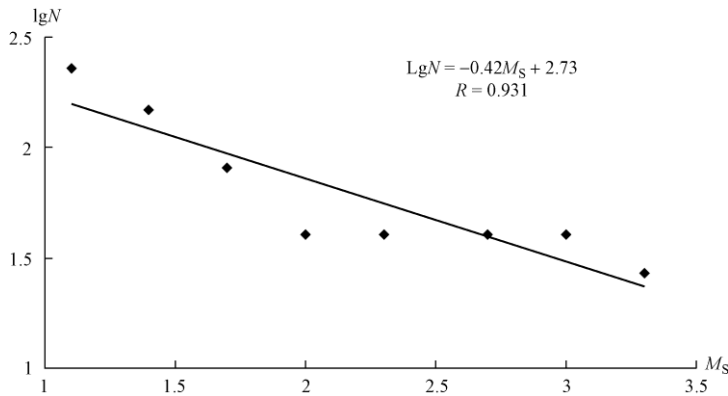


图 3 海河断裂海域段断层小区地震次数对数 $\lg N$ 与震级 M_S 的关系

Fig.3 $\lg N - M_S$ plot of earthquakes in Haihe fault area

上述计算是在划分断层小区的基础上开展的, 歧北断裂是歧口凹陷内部的次级断裂, 同时也是海河断裂的派生断裂, 中深层地震剖面显示歧北断裂在深部都归并到海河断裂上。由于歧北断裂可能是海河断裂的分支断裂, 这种断层小区在空间上和地震活动性上必定包含了歧北断裂的部分, 可以说歧北断裂未来的地震活动与海河断裂海域段裂密切相关, 因此, 评价海河断裂海域段的地震危险性, 必然要考虑歧北断裂的因素。

通过对断裂的构造变形特征及几何特征的研究, 认为海河断裂是歧口凹陷的边界断裂, 控制了歧口凹陷新生代的沉积发育历史, 是长期继承性发育的主干断裂, 其最新活动时代为晚更新世, 断裂规模较大, 活动性较强, 在未来存在着发生中强地震的条件和背景。1976年7月28日唐山地震发生当天, 在天津塘沽地区的渤海近岸海域发生了1次 $M_S 5.5$ ($M_L 5.8$) 级地震, 因此, 海河断裂海域段潜在地震的最大震级为 6.8 级的结果与该断裂的构造地质条件是相互匹配的。

同理, 根据上述方法选取海一断裂断层小区的地震目录, 根据公式(2)统一归算到 500a, 再由 G—R 关系拟合海一断裂断层小区的震级—频度关系为:

$$\lg N_f(M_S) = 4.2477 - 0.6741M_S \quad (4)$$

图 4 给出了海一断裂断层小区震级—频度关系图。由公式(4)得出海河断裂海域段的 a_f/b 值为 6.301, 根据拟合公式(1)估算, 海一断裂的潜在地震的最大震级为 $M_0 6.3$ 级。

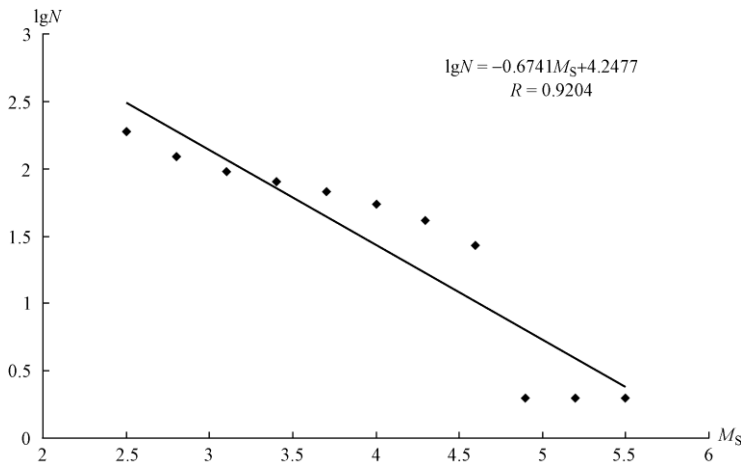


图 4 海一断裂断层小区地震次数对数 $\lg N$ 与震级 M_S 的关系

Fig.4 $\lg N - M_S$ plot of earthquakes in Haiyi fault area

上述计算是在划分断层小区的基础上开展的, 歧中断裂是歧口凹陷内部的次级断裂, 同时也是海一断裂的派生断裂, 中深层地震剖面显示歧中断裂在深部都归并到海一断裂上。由于歧北断裂可能是海一断裂的分支断裂, 这种断层小区在空间上和地震活动性上必定包含了歧北断裂的部分, 可以说歧北断裂未来的地震活动与海河断裂海域段裂密切相关, 因此, 评价海河断裂海域段的地震危险性, 必然要考虑歧北断裂的因素。

通过对断裂的构造变形特征及几何特征的研究, 认为海一断裂是歧口凹陷的边界断裂, 控制了歧口凹陷新生代的沉积发育历史, 是长期继承性发育的主干断裂, 最新活动时代为晚更新世早期, 断裂规模较大, 活动性较强, 在未来存在发生中强地震的条件和背景, 历史上

曾发生过 2 次 $M_s 5\frac{1}{2}$ 级地震, 因此, 海一断裂潜在地震的最大震级为 $M_s 6.3$ 级的结果与该断裂的构造地质条件是相互匹配的。

4.2 地震复发间隔与发震概率

采用上述地震资料, 建立海河断裂海域段断层小区的地震年发生率 λ 与震级的关系 $\lg \lambda(M) - M$ 的基本表达式为¹:

$$\lg \lambda(M) = a - bM \quad (5)$$

式中:

$$a = a_t - \lg(t) \quad (6)$$

其中, t 是用于建立式 (3) 和式 (4) 震级频度关系的地震资料时间长度(单位: a)。

由此可以得到海河断裂海域段地震年发生率 λ 与震级的关系为:

$$\lg \lambda(M_s) = 0.031 - 0.42M_s \quad (7)$$

这里, 将海河断裂海域段小区上地震发生的时间进程可以近似地看作泊松过程 (Connell, 1968)。这种过程是无记忆的, 即在给定时段内地震发生的概率与过去的破坏性地震发生的时间、地点无关。从而在任意给定时段 t 内, 小区内任一具有发震能力的断层(或小段)上发生 k 次震级 $\geq M_1$ 地震的概率 P 可由泊松分布近似表示(闻学泽, 2007):

$$P(\Delta T \text{ 年发生 } k \text{ 次 } \geq M_1 \text{ 的地震}) = \frac{(\nu_1 \cdot \Delta T)^k}{k!} \exp(-\nu_1 \cdot \Delta T) \quad (8)$$

当 $k=0$ 时, 其概率 P_1 为:

$$P_1(\Delta T \text{ 年发生 } 0 \text{ 次 } \geq M_1 \text{ 的地震}) = \exp(-\nu_1 \cdot \Delta T) \quad (9)$$

那么, 未来关注时段内至少发生 1 次地震的概率可表示为:

$$P(\Delta T \text{ 年发生 } k \text{ 次 } \geq M_1 \text{ 的地震}) = 1 - \exp(-\nu_1 \cdot \Delta T) \quad (10)$$

采用式 (10) 和式 (7) 可计算出海河断裂海域段断层小区发生相应震级档地震的平均复发间隔和发震概率(见表 1)。

表 1 海河断裂海域段断层小区地震平均复发间隔和发震概率

Table 1 The average reoccurrence and probability of earthquakes in Haihe fault area

震级 $\geq M_s$		5.5	6.0	6.5	6.8
平均复发间隔		190	308	500	668
未来发生 1 次以上地震的概率	50a	0.23	0.15	0.1	0.07
	100a	0.41	0.28	0.18	0.14
	200a	0.65	0.48	0.33	0.26

同理, 可得到海一断裂断层小区的地震年发生率 λ 与震级的关系为:

$$\lg \lambda(M_s) = 1.549 - 0.6741M_s \quad (11)$$

采用式 (10) 和式 (11) 可计算出海一断裂断层小区发生相应震级档地震的平均复发间

1 闻学泽等, 2007. 中强-弱隐伏活动断层的现今活动习性与地震危险性评价方法, 中国数字地震观测网络项目“城市活断层试验探测”子项目的子专题研究报告。

隔和发震概率（见表 2）。

表 2 海一断裂地震平均复发间隔和发震概率

Table 2 The average reoccurrence and probability of earthquakes in Haiyi fault area

震级 $\geq M_s$		5.0	5.5	6.0	6.3
平均复发间隔		94	178	337	495
未来发生 1 次以上地震的概率	50a	0.53	0.29	0.15	0.10
	100a	0.78	0.50	0.27	0.18
	200a	0.95	0.75	0.47	0.33

5 结论

(1) 通过对海河断裂海域段和海一断裂的地质构造、第四纪活动性、深部构造、构造应力场与形变场等的研究, 综合判定了海河断裂海域段和海一断裂的活动性与构造特征。研究表明, 海河断裂海域段和海一断裂都属于晚更新世断裂,

(2) 建立了海河断裂海域段和海一断裂断层小区按 500a 归算的震级—频度关系模型, 并利用天津地区的最大震级上限 M_u 与 a_r/b 的经验关系, 得出海河断裂海域段潜在地震最大震级为 $M_s6.8$, 海一断裂潜在地震最大震级为 $M_s6.3$ 。

(3) 采用泊松概率模型, 计算出了海河断裂海域段和海一断裂未来 50—200a 地震发生的概率及复发周期等定量参数, 其结果详见表 1 和表 2。

参考文献

- 陈宇坤, 刘芳, 袁盾等, 2010. 天津地区隐伏断裂地震危险性定量评价. 地震地质, **32** (1): 138—149.
- 国家震害防御司, 1990. 地震工作手册. 北京: 地震出版社.
- 黄玮琼, 李文香, 曹学锋, 1994a. 中国大陆地震资料完整性研究之一: 以华北地区为例. 地震学报, **16** (3): 273—280.
- 黄玮琼, 李文香, 曹学锋, 1994b. 中国大陆地震资料完整性研究之二: 分区地震资料基本完整的起始年分布图象. 地震学报, **16** (4): 423—432.
- 闻学泽, 徐锡伟, 龙锋等, 2007. 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. 地震地质, **29** (2): 236—253.
- Cornell C.A., 1968. Engineering seismic risk analysis. Bull. Seis. Soc. Am., **58** (5): 1583—1606.

Seismic Risk Evaluation on Blind Faults in Tianjin Offshore Areas

Liu Hongyan, Chen Yukun, Yan Chengguo and Yang Fei

(Earthquake Administration of Tianjin Municipality, Tianjin 300201, China)

Abstract The tectonic structure, Quaternary activity, deep structure, stress and strain fields and seismicity on the faults in Tianjin offshore areas are studied through field surveying in order to determine the activity and tectonic features synthetically. Using seismo-geological data, as well as the historical and modern seismicity data, the frequency-magnitude relationship model reckoning by 500 years is established. Based on the relationship between the upper limit of maximum magnitude M_u and a/b , we calculate the maximum magnitude of the Haihe river fracture sea section and Haiyi fault. Then Poisson probability model is adopted and quantitative parameters such as the maximum magnitude, occurrence probability, recurrence period of the faults in south Tianjin offshore areas in coming 50-200 years are calculated.

Key words: Seismic risk; Quantitative evaluation; Fault sub-area; Frequency-magnitude relationship; Maximum magnitude; Occurrence probability; Recurrence period