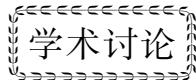


文章编号: 0253-3782(2007)05-0549-09



## 学术讨论

# 渤海海域历史地震和海啸<sup>\*</sup>

王 健<sup>\*</sup>

(中国北京 100081 中国地震局地球物理研究所)

**摘要** 渤海海域中小地震定量分析结果显示, 渤海中存在多个地震密集区。地震密集多呈 NE 向分布, 但也确有 NW 向活动存在。大致以 39°N 为界, 渤海南部与北部的地震活动差异悬殊, 几乎所有的强震和中小地震密集都集中于南部。综合史料和中小地震密集特征, 对公元 1548 年震中位置进行了校订, 对 1888 年地震的震级进行了讨论。探讨了 173 年地震事件作为一次地震海啸的可能性。对 1597 年地震事件作为一次渤海强震提出了质疑。

**关键词** 地震活动 历史强震 地震密集 海啸 渤海

**中图分类号:** P315.5      **文献标识码:** A

## 引言

我国历史悠久, 也是多地震的国家, 对地震的文字记载较早, 留下了极丰富的地震史料。新中国成立后, 我国的地震工作者进行过两次较大规模的历史地震史料整理, 编辑并正式出版了 4 版地震目录。充分利用悠久丰富的历史地震资料是我国地震学研究颇具特色的一个方面, 为国际同行所关注和羡慕。尽管历史地震研究取得了丰硕的成果, 得到了广泛的应用, 但一些地区存在着史料不完备、地震参数误差较大、可信程度不高等问题, 特别是海域此类问题尤为突出。渤海处于十分重要的位置, 环渤海经济圈的发展, 海港、海上石油勘探等大型工程的建设, 尤显该地区防震减灾任务的艰巨。从地震学和地质学研究方面来讲, 渤海恰是 NE 向的郯城—庐江地震带和 NW 向的张家口—渤海地震带的交汇部位, 历史上发生过多次强震。

传统的方法是通过史料的确认来进行历史地震参数的校订和可信度分析的, 但这种方法对于渤海海域则难以奏效。本文通过定量分析中小地震活动特征及其与历史强震的关系, 来探讨历史地震参数校订和可信度分析的新方法。

## 1 历史强震史料及参数

1949 年以来, 我国共正式出版过 4 版全国地震目录(李善邦等, 1960; 中央地震工作小组办公室, 1971; 顾功叙等, 1983; 闵子群等, 1995; 汪素云等, 1999), 本文分别将其简

\* 科技部科研院所社会公益研究专项《中国沿海地区古海啸的定量研究》(2005DIB3J118)和中海石油综合性科研课题《渤海海域地震动区划研究》(ZHKY2005-023)资助。中国地震局地球物理研究所论著 07AC1019。

2007-05-10 收到初稿, 2007-07-30 决定采用修改稿。

† 通讯作者。e-mail: wangjian@cea-igp.ac.cn

称为一、二、三和四版目录，其中第四版地震目录分为两个部分。本文还参考了其它地震目录和文献(谢毓寿等, 1983; 1989; 吴戈等, 2001; 国家地震局地球物理研究所, 复旦大学中国历史地理研究所, 1986, 1990)。研究区域为渤海海域, 大致范围为  $117.5^{\circ}\sim 122.5^{\circ}$  E,  $37.0^{\circ}\sim 41.0^{\circ}$  N。研究范围内 6 级以上强震及参数列于表 1。

表 1 渤海海域强震( $M\geq 6$ )参数表

序号	年-月-日	$\varphi_N/^\circ$	$\lambda_E/^\circ$	震级	震中误差/km	资料来源
1	173-07*					中央地震工作小组办公室, 1971; 顾功叙等, 1983; 闵子群等, 1995
2	1548-09-22	37.8	120.7	6		李善邦等, 1960; 中央地震工作小组办公室, 1971
		38.0	121.0	7	>100	顾功叙等, 1983; 闵子群等, 1995; 吴戈等, 2001
3	1568-05-05	39.4	118.9	6		李善邦等, 1960
		39.0	119.0	6	>100	中央地震工作小组办公室, 1971; 顾功叙等, 1983; 闵子群等, 1995; 吴戈等, 2001
4	1597-10-06	38.5	120.0	7	>100	顾功叙等, 1983; 闵子群等, 1995
5	1888-06-13	38.5	118.5	7		李善邦等, 1960
		38.5	119.0	7½	50~100	中央地震工作小组办公室, 1971; 顾功叙等, 1983; 闵子群等, 1995
6	1922-09-29	39.2	120.5	4¾~5	>100	李善邦等, 1960(注: 时间为世界时)
		39.2	120.5	6½	>100	中央地震工作小组办公室, 1971; 顾功叙等, 1983; 汪素云等, 1999
7	1969-07-18	38.2	119.4	7.4	<25 km	顾功叙等, 1983; 汪素云等, 1999

注: \* 表示缺少数值。此条源于“后汉书”: 东汉灵帝熹平二年六月, 北海地震。东莱、北海海水溢。被认为是一次地震海啸, 但无法确定震中位置和震级等参数, 收录于各版地震目录的附录中。

从表 1 中可以看到, 渤海海域共有 7 级地震 4 次, 6 级地震 2 次, 地震海啸一次。其中 1969 年 7.4 级地震有仪器记录, 震中位置误差最小。20 世纪上半叶属仪器记录早期, 地震参数也有很大的误差。1922 年 9 月 29 日渤海地震, 从二版目录开始, 参数定为  $39.2^{\circ}$ N、 $120.5^{\circ}$ E, 震级为 6½, 震中误差大, 震级误差可达 ±0.4(谢毓寿等, 1989)。1900 年以前的历史强震问题更多, 4 次强震中有 3 次震中误差在 100 km 以上。本节将主要针对历史强震, 对已有的史料进行综合分析。

### 1.1 1548 年 9 月 22 日渤海海中 7 级地震

从表 1 中可以看到, 一版和二版的地震目录所给的参数一致: 震中位置  $37.8^{\circ}$ N、 $120.7^{\circ}$ E, 震级 6。其后各版地震目录所给的参数为: 震中  $38.0^{\circ}$ N、 $121.0^{\circ}$ E, 震级 7。从震害描述上看, 从二版目录开始, 资料有所增加, 主要是增加了河北等地。到三版目录时, 又增加了朝鲜的资料。登州府城(蓬莱)“城崩, 屋倒塌者甚多”这点始终未变, 蓬莱破坏最重, 烈度被定为 VIII 度是合适的。此次地震震中被认为在蓬莱外海中也是一致的看法(闵子群等, 1995)。

### 1.2 1568 年 5 月 5 日渤海海中 6 级地震

关于此次地震的史料和地震参数各版目录较为一致。乐亭破坏最重: “坏民屋, 东郊刘庄地裂二所, 各长三丈余, 涌黑沙水”。一版目录将震中就定在乐亭。从二版目录起, 补

充了山东境内的记载点(闵子群等, 1995), 即扩展了此次地震在渤海南岸的记载范围, 随之认定震中还应向南移, 应在渤海海中。以后各版地震目录均为此结论。

### 1.3 1597年10月6日渤海海中7级地震

此次地震在一版和二版目录中没有, 从三版目录开始增补, 其后各版目录中参数较为一致。此次地震有诸多值得关注之处, 首先是有关范围大。有关范围波及南到江苏、安徽北部, 北到辽宁, 东包括朝鲜, 西至山西以及河北、山东、河南诸省。其次是没有记载到任何破坏, 再者是持续时间长, “连震三日”。另一个显著特点就是, 在记载地震的同时, 有大量河、湖、井“水动”、“水溢”、“水沸”等记载, 山东、江苏、河北、河南、安徽等地均有此类记载。此外长白山火山喷发, 也是显著的伴生现象(闵子群等, 1995)。

### 1.4 1888年6月13日渤海地震

此次地震造成渤海沿岸的滦县、昌黎、乐亭、无棣、利津、惠民等地房屋破坏不可胜计, 人员有伤亡。北京、辽宁、河北、山东俱有感(闵子群等, 1995)。震中位置一版目录定为  $38.5^{\circ}\text{N}, 118.5^{\circ}\text{E}$ , 震级定为 7。从二版目录开始, 将震中位置向东移至  $119.0^{\circ}\text{E}$ , 震级提高至  $7\frac{1}{2}$ 。对比这两版目录所给的震害资料可以看到, 二版目录中将 VI 度区范围向东扩展至昌邑、潍坊等地, 震级提高, 同时震中向东移动, 参数的这种变动是合理的。三版目录沿用了二版的等震线图和参数。四版目录及中国历史地震图集将 VI 度区范围继续向东扩大至蓬莱, 但参数未变。几个版本的地震目录所给出的地震烈度分布, 尽管不甚完整, 但均呈现明显的 NE 向分布。

## 2 仪器记录地震时空分布特征定量分析

### 2.1 仪器记录地震资料和网格点密集值计算方法

渤海海域 1970 年 1 月—2005 年 12 月, 共记录到  $M_{\text{L}} \geq 2$  地震 1937 次。其中  $M_{\text{L}} 5$  地震 3 次,  $M_{\text{L}} 4$  地震 39 次,  $M_{\text{L}} 3$  地震 395 次,  $M_{\text{L}} 2$  地震 1 500 次。有深度数据的 418 次, 约 70% 地震震源深度集中分布于 10~30 km 范围内。有研究表明, 渤海海域  $M_{\text{L}} 3$  地震基本完整,  $M_{\text{L}} 2$  地震略有缺失(焦远碧等, 1990)。

网格点密集值的具体计算方法是: 在研究区内, 以一定的空间间隔( $\Delta$ )划网格。以网格的  $j$  节点为中心, 假定在以  $R$  为半径的范围内对于给定震级( $m$ )和时段( $t$ )的地震数为  $n$ , 则该点的密集值  $V_{j, m, t}$  为

$$V_{j, m, t} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{\ln(D_i)} \quad e \leq D_i \leq R \quad (1)$$

式中,  $\ln(\cdot)$  为自然对数,  $D_i$  为第  $i$  次地震距  $j$  节点的距离。该式的含义是: 以地震到节点距离对数的反比累计选震范围内所有地震对  $j$  节点的贡献。密集值与地震次数成正比, 与距离成反比, 它综合地反映了地震次数和疏密程度。对于整个研究区, 所有网格点的密集值组成的等值线, 就构成了该时段内给定震级的地震活动性图象。研究表明, 计算得到的地震活动图象是稳定的(王健, 2001)。

### 2.2 地震密集的空间分布

应用网格点密集值计算方法, 对研究区 1970—2005 年记录到的地震进行了定量处理, 结果如图 1 所示。计算时, 网格间距取  $0.05^{\circ}$  经纬度,  $R$  值为 15 km。图中还绘制了中小地震和历史强震震中分布。从图 1 中可以看到, 渤海范围存在多个中小地震密集区, 对密集

值较高的 6 个密集区划定了范围。图中同时显示了密集区范围和编号。划分密集区的依据主要是根据中小地震密集等值线的闭合曲线，取其外包络线。6 个密集区包括 1969 年渤海 7.4 级地震余震区、蓬莱和长岛密集区、砣矶镇和钦岛密集区等。另外，渤海海域及沿岸还有一些密集值不太高的密集区，如北港、唐海、三山岛等。3 号密集区的北面，有一面积较大且较为松散的密集区。

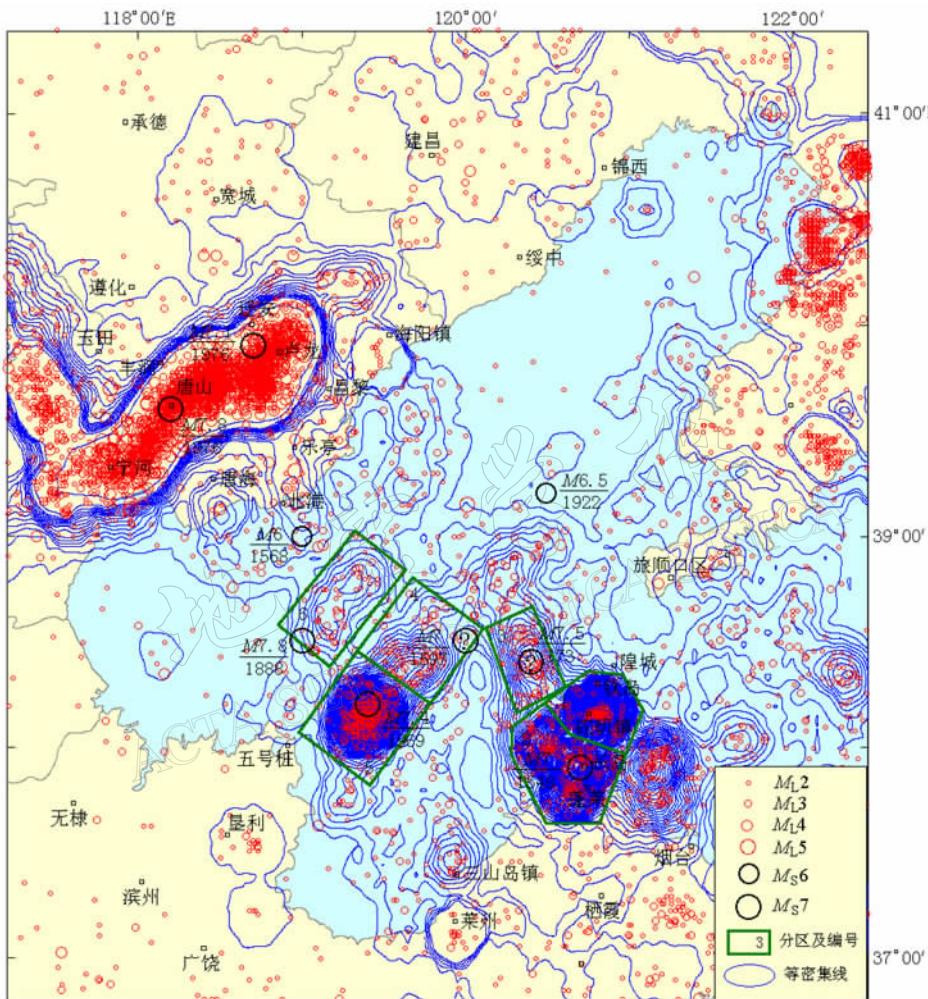


图 1 密集区及地震震中分布图

### 2.3 密集区内地震时间的分布特征

将各个密集区内的中小地震分不同震级计算每年的地震次数，并绘于图 2。图中纵坐标为  $M_{L2}$  地震月频次， $M_{L3}$  以上地震为年频次。从图 2 中可以较为清楚地看到，各个密集区内各级地震随时间的分布是不同的。通过对华北地区其它一些典型地震密集区的分析，我们已经认识到地震密集可以划分为不同的类型(王健，2002)。其中历史上发生过大地震的密集区，其地震随时间分布较为均匀。另一种类型为：历史上没有发生过大地震，则其时间分布不均匀(王健等，2004a)。在给出的 6 个密集区中，只有 1 号区内地震的时间分布

极不均匀，呈现脉冲状，表现为新区，即历史上应当没有大地震的发生；5号密集区内包含有1969年渤海地震的余震，其时间分布特征与其它密集区也有不同。其余4个地震密集区具有历史强震震中区的特征。

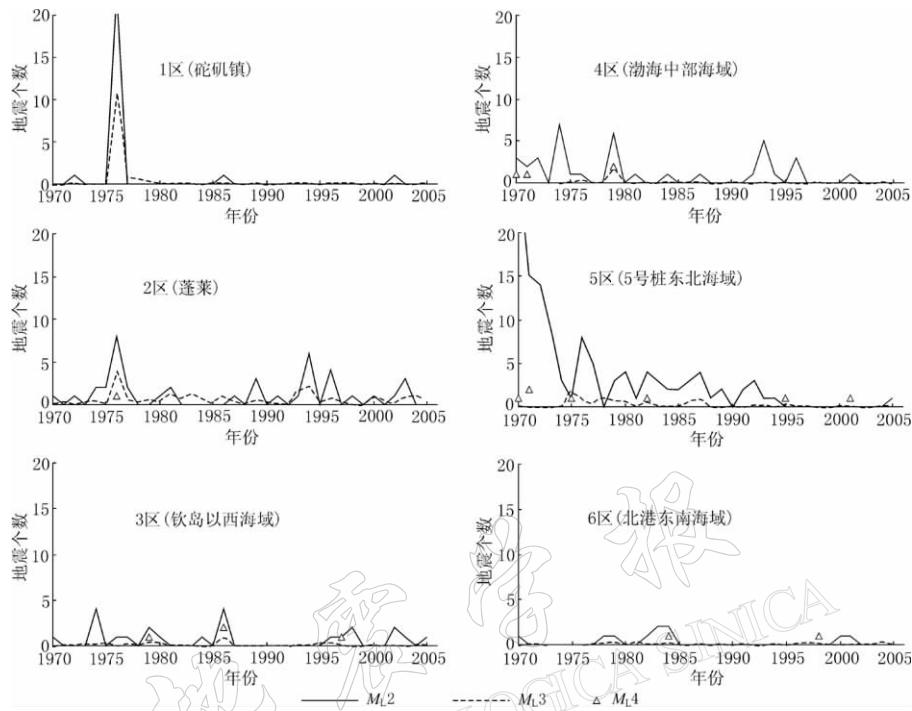


图2 密集区内不同震级地震随时间分布

### 3 历史地震参数校订和可信度分析

#### 3.1 利用中小地震密集校订历史地震参数的基本思路和原则

大量地震观测及岩石实验研究成果表明，一次强烈地震的发生，不管是现今的强震还是历史强震，都是一次物理过程，对局部地壳介质会造成一定程度的破坏，并产生长期效应，如现今中小地震活跃等（王泽皋，1985；王健，1999；Sondergeld, Estey, 1981）。据此，历史地震震中应当在中小地震密集区内。密集区的形状和尺度可能与其震级有关。通过对由历史文献所确定的历史地震参数与特定类型的中小地震密集是否一致，来进行历史强震的参数校订和可信度分析。

利用中小地震密集区校订历史地震参数有如下原则：①由历史文献资料确定的震中位于中小地震密集区内，则采用原有震中位置，不再调整；②当原有震中位于中小地震密集区外，须将震中调整到密集区内，则直接将震中定在密集中心。对于椭圆形密集区，则置于其几何中点；③当震中位于密集区中心时，震中定位精度为密集区几何尺度的一半，对圆形取为半径，对于椭圆形则取半长轴。而当震中未位于密集区中心时，则震中定位精度即是密集区的几何尺度，对圆形取为直径，对于椭圆形则取长轴。

#### 3.2 1548年渤海7级地震参数校订

从前面1.1节我们知道，此次地震造成蓬莱烈度达Ⅷ度，震中应在蓬莱外海中。从图3

中可以看到,蓬莱外海中对应 1 号和 2 号两个密集区。对这两个密集区分别进行时间分析后发现,1 号密集区内地震活动主要集中在 1976 年,  $M_{L3}$  地震当年达到了 23 次, 同期  $M_{L2}$  地震月频度达到 11 次左右。与山西的昔阳一和顺密集区相类似(王健等, 2004a), 说明该区历史上没有强烈地震发生。从震级结构和震源深度分布特征也反映出砣矶岛震群不同的特征(魏光兴, 李秉锋, 1980; 王健, 1999)。由此我们判断, 蓬莱外海中 2 区的中小地震密集在很大的程度上与历史强震相关, 也最有可能是 1548 年地震的震中位置所在。此次地震的震级为 7 级较为适宜。图 3 展示了各版地震目录所给出的 1548 年地震震中位置及本文确定的位置。本文确定的震中位置在长岛附近, 具体经纬度见表 2。根据密集区的尺度可以确定震中的精度应为 3 类, 即误差在 50 km 之内。

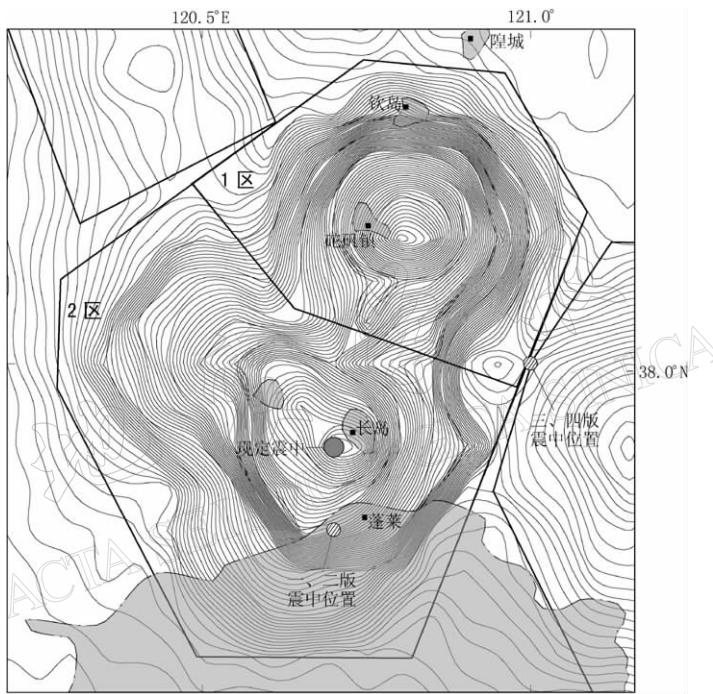


图 3 1548 年渤海 7 级地震震中变动示意图

### 3.3 173 年地震海啸的可信度分析

1969 年和 1888 年渤海地震都未引起地震海啸, 它们都属 NE 向。渤海海域 NE 向断裂以走滑为主已有较广泛的认同, NW 向活动是否会有不同确实值得考虑。在符合条件的 5 个密集区中, 3 号密集区是唯一的 NW 方向, 且呈偏椭圆形状, 其形态与 1888 年地震密集区相仿, 但尺度相对要小, 也与华北地区其它 7½ 地震密集区形状类似。将 3 号密集区与一次历史强震对应的话, 其震级应为 7½, 震中可取密集区中心, 参数详见表 2。如果记载的 173 年事件确是一次地震海啸, 其与 3 号密集区对应的可能性是值得考虑的。

### 3.4 1597 年地震事件作为一次渤海 7 级地震的存疑

此次地震最大的问题是作为渤海的一次 7 级地震证据不足。如此大的有感范围, 远超过一次 7 级地震的有感范围, 但却没有在渤海周边造成破坏, 这是渤海其它 7 级地震所没有的。如果确是渤海中的一次 7 级地震, 沿岸应当有破坏。

表 2 渤海海域强震参数校订表

序号	年-月-日	$\varphi_N/^\circ$	$\lambda_E/^\circ$	震级	震中误差/km	备注
1	173-07-*	38.4	120.4	7½	50~100	新补充，有待研究
2	1548-09-22	37.9	120.7	7	25~50	震中和精度变动
3	1568-05-05	39.0	119.0	6	25~50	精度变动
4	1597-10-06					疑难地震，有待研究
5	1888-06-13	38.0	119.0	7½	50~100	没有变动

注：\* 表示缺少数值。

### 3.5 渤海海域强震参数校订结果

从图 1 中可以看到，6 号密集区呈偏长椭圆型，与 1888 年地震对应。震中在密集区的一端，认定原震中位置和震级应较为合理。考虑 6 号密集区的尺度，将震中定位精度确定为 4 类也是合适的，因此保持原参数不变。除上述地震外，1568 年 4 月 25 日渤海海中 6 级地震在中小地震密集图上也可找到对应的密集区，但密集值略显低些，与 6 级左右强震稍显不符，可能与海域  $M_{L2}$  地震记录的完整性和定位精度有关，但中小地震密集还是支持原参数的，震中位置及震级不变。根据密集区尺度可将精度提升为 3 类，具体参数详见表 2。综合史料和中小地震密集，对渤海海域历史地震参数校订结果详见表 2。

## 4 讨论和结论

### 4.1 讨论

1) 时振梁等(1985)曾专门撰文讨论 1597 年的地震事件，认为它很有可能是一次慢地震，以此说明长周期的成分丰富，以解释大量“水溢”的现象。综合有感范围大、没有破坏、大量“水涌”的记载及长白山火山喷发等诸多方面情况，笔者认为它极有可能是发生在吉林汪青、珲春一带的一次巨大深源地震。我国吉林汪青、珲春一带是一个著名的深震集中发生区域。在  $129^\circ \sim 131^\circ E$ 、 $39^\circ \sim 44^\circ N$  这狭长区域内，1900 年以来仪器记录的 7 级以上深震多达 8 次(Wang *et al.*, 2007)。深震的一个特点就是有感范围大，但却不造成地面建筑破坏。最近的一次 7.1 级深震发生在 2002 年 6 月 29 日，它的有感范围大致在东北大部、内蒙古东部的部分地区，南面到河北中部的部分地区。远未达到江苏、安徽以及山西等地。“连震三日”可能是深震群。目前，还不能用我们已经认识到的现代深震现象来全部合理地解释历史记载的真正物理涵义。将事件暂定为“疑似”深震或深震群，相关问题有待深入研究。

2) 决定地震海啸的因素很多，震源处的水深只是其中之一(王健等, 1993)。尽管渤海水深最深只有 60 m，过去有一种观点认为渤海发生地震海啸的可能性不大，但 1948 年威海外海中的一次 6 级地震，震中处的水深只有约 20 m，却也引起了海啸(王健等, 2004b)。渤海海域中 NW 向中小地震活动的震源机制有待进一步研究。

3) 探讨了 173 年地震事件作为一次地震海啸的可能位置和震级。对 1597 年地震事件作为一次渤海强震提出了质疑。

4) 从其它震例来看，震级较大的地震(震级往往大于 7½)其等震线和震中的中小地震密集区可能呈偏长椭圆型。据此，1888 年地震的震级如提高至 7½，也是今后值得探讨的问题。诚然，中小地震密集区的形状和尺度与震级的关系尚有待更多震例的统计结果的支持。

## 4.2 结论

1) 渤海海域地震密集呈明显的 NE 向分布, 或两个密集区排列成 NE 向分布。NE 向分布呈主导地位, 至少有 3 条基本平行的 NE 向分布, 但也确有 NW 向存在。NW 向地震密集受限于 NE 向地震密集, 构成了较为复杂的图象。

2) 大致以  $39^{\circ}\text{N}$  为界, 渤海南部与北部地震活动的差异悬殊, 几乎所有的强震和现代中小地震密集都集中于南部, 而北部却相对地平静。

3) 综合史料和中小地震密集特征分析, 将 1548 年 7 级地震震中调整至蓬莱外海中、长岛附近, 定位精度升为 2 类。

中国地震局地球物理研究所高级工程师吴宣为本文绘制了图件, 特此致谢。

## 参 考 文 献

- 顾功叙, 林庭煌, 时振梁, 等. 1983. 中国地震目录(公元前 1831 年—公元 1969 年)[M]. 北京: 科学技术出版社: 41-658.
- 国家地震局地球物理研究所, 复旦大学中国历史地理研究所. 1986. 中国历史地震图集(明时期)[M]. 北京: 中国地图出版社: 79-124.
- 国家地震局地球物理研究所, 复旦大学中国历史地理研究所. 1990. 中国历史地震图集(清时期)[M]. 北京: 中国地图出版社: 201-202.
- 焦远碧, 吴开统, 杨满栋. 1990. 我国地震台网监测能力及台网观测条件质量评定[J]. 中国地震, **6**(4): 1-7.
- 李善邦, 武宦英, 郭增建, 等. 1960. 中国地震目录[M]. 北京: 科学出版社: 8-222.
- 闵子群, 吴戈, 江在雄, 等. 1995. 中国历史强震目录(公元前 23 世纪—公元 191 年)[M]. 北京: 地震出版社: 97-508.
- 时振梁, 李群, 武宦英, 等. 1985. 中国历史上一次可能的慢地震[J]. 地震学报, **7**(3): 342-347.
- 汪素云, 吴戈, 时振梁, 等. 1999. 中国近代地震目录[J]. 北京: 中国科学技术出版社: 23-222.
- 王健, 时振梁. 1993. 海啸及其在核电厂选址中的安全评价[J]. 地震地质, **15**(4): 364-368.
- 王健. 1999. 地震活动性震级结构特征及其应用研究[D]: [学位论文]. 北京: 中国地震局地球物理研究所: 61-62.
- 王健. 2001. 地震活动性图象处理的网格点密集值计算方法[J]. 地震学报, **23**(3): 262-267.
- 王健. 2002. 小地震活动定量分析及其应用研究[G]//中国地震局地球物理研究所等编著. 新世纪地震工程与防震减灾. 北京: 地震出版社: 474-480.
- 王健, 吴宣, 张晓东, 等. 2004a. 1303 年山西洪洞 8 级地震高烈度区内地震活动特征及其物理意义[J]. 地震学报, **26**(4): 347-354.
- 王健, 汪素云, 肖广银, 等. 2004b. 1948 年山东威海地震再调查和参数校订[J]. 中国地震, **20**(4): 419-424.
- 王泽皋. 1985. 大震区的“长期活动”[J]. 地震学报, **7**(3): 254-266.
- 魏光兴, 李秉锋. 1980. 1976 年春季山东庙岛群岛两次小震群[J]. 地震学报, **2**(3): 258-257.
- 吴戈, 刘昌森, 翟文杰, 等. 2001. 黄海及其沿岸历史地震编目与研究[M]. 北京: 地震出版社: 3-78.
- 谢毓寿, 蔡美彪, 王会安, 等. 1983. 中国地震历史资料汇编(第一卷)[M]. 北京: 科学技术出版社: 29-30.
- 谢毓寿, 程德利, 丁学仁. 1989. 1900—1980 年中国  $M \geq 4.7$  地震的均一震级目录[M]. 北京: 地震出版社: 2-68.
- 中央地震工作小组办公室. 1971. 中国地震目录[M]. 北京: 科学出版社: 40-241.
- Sondergeld C H, Estey L H. 1981. Acoustic emission study of microfracturing during the cyclic loading of westerly granite[J]. *J Geophys Res*, **86**(B4): 2 915-2 924.
- Wang Jian, He Xuesong, Li Yiqun. 2007. Seismic characteristics of strong deep focus earthquakes and associated phenomena in Northeast Asia[M]// *Advances in Geosciences, Volume 1: Solid Earth (SE)*. Singapore: World Scientific Publishing Co Pte Ltd: 23-39.

## HISTORICAL EARTHQUAKES AND A TSUNAMI IN BOHAI SEA

Wang Jian

(Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing 100081, China)

**Abstract:** Quantitative analysis on seismicity showed that there are several seismic dense zones in Bohai Sea. These seismic dense zones of modern small earthquakes behave prominent NE orientation, although a seismic dense zone with NW direction exists actually. Taking 39°N as a boundary, seismicity in the south is different from that in north of Bohai. Almost all strong earthquakes and seismic dense zones are concentrated in the southern part. Based on archives and seismic dense characteristics, we amended the epicenter of strong earthquakes in 1548 and discussed about magnitude of the earthquake in 1888. Possibility of the event in 173 as a tsunami was discussed. The event in 1597 was doubted as a strong earthquake in Bohai.

**Key words:** seismicity; historical earthquakes; seismic density; tsunami; Bohai Sea