

王华林, 胡超, 王纪强, 陈平, 刘霞, 2015. 烟台市及其邻近地区活断层地震危险性评价. 震灾防御技术, 10 (2): 211—226.
doi: 10.11899/zzfy20150202

烟台市及其邻近地区活断层地震危险性评价¹

王华林 胡超 王纪强 陈平 刘霞

(山东省地震工程研究院, 济南 250021)

摘要 本文是“十二五”国家科技支撑计划项目专题(2012BAK19B04-01)“郯庐地震断裂带中段地震活动规律及地震危险区判定研究”部分成果的总结。在分析了烟台市及其邻近地区的地震地质、地球物理、断层综合地球物理探测、探槽开挖、断层活动性鉴定等技术手段获得的反映区域地震构造环境、深部构造背景、活动断裂长期滑动习性的定性和定量资料、历史与现代地震活动性和地球动力学资料的基础上, 甄别出了具有发生破坏性地震的活断层段。同时采用定性、定量和综合判定的方法, 评价了烟台市及其邻近地区主要活动断裂的地震危险性。本文的研究成果可为胶东半岛地区的地震监测预报、地震区划、震害预测和断层危害性评价提供基础依据。

关键词: 活动断裂 判定方法 最大震级 地震危险性评价 烟台市

引言

本文是“十二五”国家科技支撑计划项目专题(2012BAK19B04-01)“郯庐地震断裂带中段地震活动规律及地震危险区判定研究”部分成果的总结。烟台市及其邻近地区活断层地震危险性评价采用的主要技术途径为: 地震构造背景与地震活动性分析→构造应力场特征→断裂活动性分段划分→分段发震能力定性与定量判定→烟台市城区及其邻近地区主要断裂最大发震能力综合评价。

在烟台市及其邻近地区活断层地震危险性评价中, 笔者分析和吸收了烟台市活断层探测与地震危险性评价²、山东半岛北部近海地震区划³, 以及晁洪太等(1999; 2001)、郭玉贵等(2005; 2007)、李西双等(2010)、吕悦军等(2003)、马保起等(2004)、王华林(1998; 2000)、王志才等(2006a; 2006b)、周本刚等(2002)和笔者多年调查研究等资料。烟台市活断层探测与地震危险性评价及山东半岛北部近海地震区划是山东省防震减灾“十一五”规划项目, 两个项目的研究成果均通过了山东省地震局组织的专家验收。在两个项目的实施过程中, 获取了烟台市及其邻近地区陆域和海域活断层大量的地球物理探测、地质地貌调查、探槽开挖、年代学测试和断层

1 基金项目 “十二五”国家科技支撑计划项目专题(2012BAK19B04-01)“郯庐地震断裂带中段地震活动规律及地震危险区判定研究”

2 山东省地震工程研究院, 2014. 烟台市活断层探测与地震危险性评价技术报告.

3 山东省地震工程研究院, 2007. 山东半岛北部近海地震区划工作报告.

[收稿日期] 2014-12-29

[作者简介] 王华林, 男, 生于1958年。1982年毕业于山东科技大学区域地质调查与矿产普查专业; 1984年在中国地震局兰州地震所获地震地质专业硕士学位; 现任研究员。主要从事活断层探查、地震区划、工程地震和断层危害性评价的理论与应用研究工作。E-mail: whl580126@163.com

显微结构鉴定资料,为烟台市及其邻近地区活断层地震危险性评价提供了重要的科学依据。

利用地震地质、深部构造、地球物理探测、探槽开挖、断层活动性鉴定和地震活动性等综合研究成果,本文获得了反映区域地震构造环境、深部构造背景、主要活断层长期滑动习性的定性和定量资料,同时配合历史与现代地震活动性分析、地壳动力学分析,甄别出了具有发生破坏性地震的活断层段,并采用定性、定量和综合方法,评价了烟台市及其邻近地区主要断裂的地震危险性(控震能力)。本项研究成果为胶东半岛地区的地震监测预报、地震区划、震害预测和断层危害性评价提供了基础依据。

1 区域地震构造背景、构造应力场和震源破裂性质

1.1 区域地震构造背景和地震活动特征

烟台市城区及其邻近地区在大地构造分区上涉及胶辽、鲁西、苏北—胶南和冀东—渤海断块,其位于鲁东断块的北部。郯庐断裂带、张家口-蓬莱断裂带、渤海强震构造区(郯庐断裂带与张家口-蓬莱断裂带的交汇区)和鲁东地块区内的北东向和近东西向活动断裂带,构成了本区的活动构造格局(晁洪太等,1997;王华林,1998;2000)。这些断裂在第四纪时期有过一定程度的活动,对区域中、强地震具有明显的控制作用。

郯庐断裂带、渤海强震构造区、蓬莱-威海断裂带是区域性的重力、航磁、地热、形变和壳幔结构的综合地球物理异常带(方仲景等,1987;魏梦华,1980;王华林,1998)。历史上在渤海强震构造区曾发生过多次强震,如:1597年渤海7级地震、1888年渤海7½级地震、1969年渤海7.4级地震等,地震活动具有频度高、强度大的特点。其中张家口-蓬莱断裂带具有明显的分段活动特点,各段的构造运动及地震活动存在明显的差异,地震活动由蓬莱向威海逐渐变弱,沿断裂带曾发生过渤海海峡1548年7级地震和1948年威海北6级地震。而鲁东断块区内的北东向和近东西向活动断裂带对5—6级地震有控制作用。

区域性地壳、上地幔变异带、航磁、重力、地热梯度带与地震关系的研究结果表明(马杏垣,1987;1989;李家正等,1983;王晓青等,1988;张碧秀等,1988),强震大多分布在块状正磁异常区的边缘部位,或2个正磁异常的夹峙部位,长条形大面积正磁异常区的端部、交叉部位和扭曲畸变部位利于强震的发生。不规则正负重力异常区、交替变化幅度较大的部位、异常带交汇和分叉部位以及重力异常线弯曲部位的端点,多有强震震中分布。强震活动带与上地幔隆起带和地壳厚度梯度带相对应,大地震往往发生在上地幔隆起的翼部和转折部位(叶洪等,1980)。地震的发生与地幔热力场的深度变化、居里面隆起及梯度带关系密切(解政文,1980;刘光夏等,1996)。烟台市城区及其邻近地区位于区域性北西西向地壳、上地幔变异带和航磁、重力、地热梯度带带上,受北东向断裂影响梯度带向北东向发生扭曲畸变(王华林,1998),具有发生中、强地震的构造背景。

1.2 构造应力场与震源破裂性质

利用华北及邻区近10多年GPS测量结果和欧亚板块的弹性运动模型,张培震等(2002a;2002b)和张静华(2004)研究了华北地区的水平形变场和局部水平形变场后发现,华北地区水平形变场存在比较一致的南东向运动,且运动方向沿顺时针方向逐渐旋转。同时应用地块的整体旋转与线性应变模型,计算出了华北地区主要断裂带两侧的相对运动和各地块内部的主应变场为:华北地区东西向和北西西向断裂基本上为左旋走滑型,滑动速率从东向西逐渐减小;北北东向和北东向断裂基本上为右旋走滑型,从北向南滑动速率逐渐减小。华北地区

应变场的基本格架是：北东东-南西西方向压缩与北北西-南南东方向扩张，主压应变率从西向东逐渐增大，而主张应变率从西向东逐渐减小。根据全区水平形变场与应变场的基本特征推测，青藏高原北东方向的推挤力（周玖，1983）、太平洋板块向欧亚板块俯冲对华北地壳产生的西向推挤力（汪一鹏，1979）和地壳上隆所产生的北西-南东方向的扩张力（黄培华等，1983）是华北地区和本研究区构造运动与形变的主要驱动力。

利用华北地区发生的一系列强震资料，李钦祖（1980）、魏光兴等（1993）、许忠淮等（1983）和周翠英等（1992）对该区的地震断层面解进行的研究表明：华北地区中强地震断层面解是一致的，特别是发生的几个 7 级左右的强震，不但主压应力轴走向非常一致，均为北东东向（北东 70°左右），而且与水平面的夹角均小于 20°；主张应力轴走向均为北北西-南南东向，与水平面的夹角也都小于 20°；华北地区正好处在北东东-南西西向挤压的现代构造应力场中。

经统计分析本文得到了研究区的综合机制解：P 轴的平均方位为 75.5°；T 轴的平均方位为 345.3°（图 1）。P、T 轴平均倾角均小于 10°；77 个单震震源机制解 P、T 轴优势方位分别为 80°和 340°左右；P、T 轴的倾角主要在 30°以内，占总数的三分之二多。综合分析可知，由地震资料获得的研究区现代构造应力场主压应力轴方向为北东东向，在 70°—80°左右；主张应力轴方位为北北西向，在 340°—350°左右。力的作用方式为水平或近于水平，作用力的倾角低于 30°。研究区应力场总体特征与华北大区域应力场基本一致。

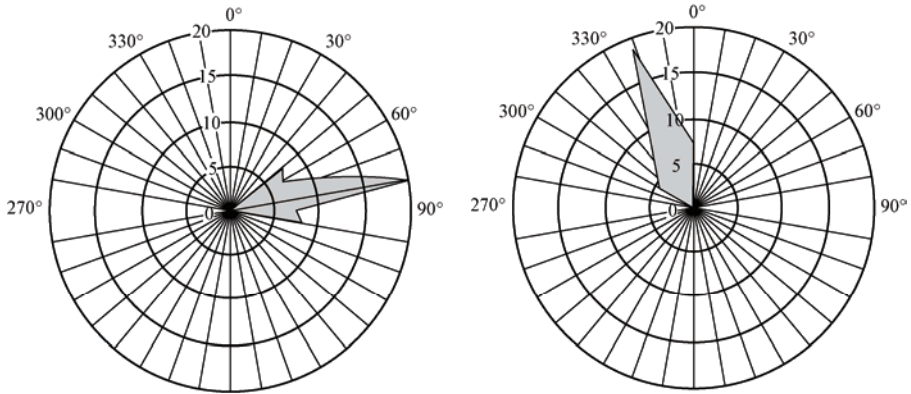


图 1 单震综合震源机制解 P、T 轴方位

Fig. 1 Direction of P and T axle from synthetic focus mechanism solution

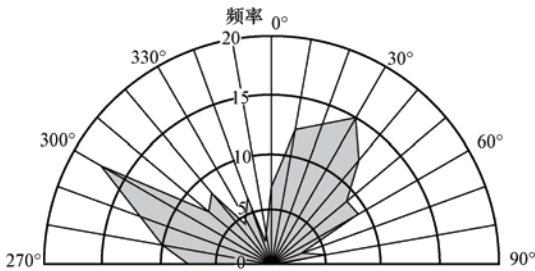


图 2 综合震源机制解 A、B 节面走向

Fig. 2 Strikes of plane A and B from synthetic focus mechanism solution

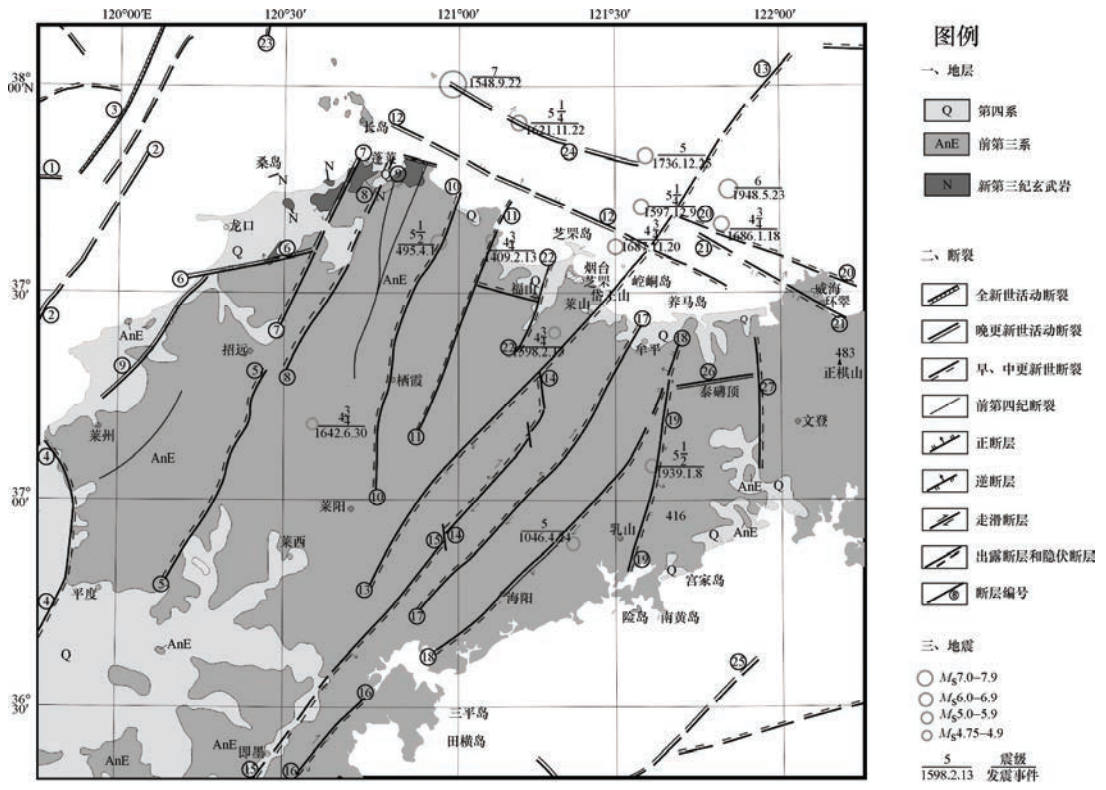
在研究区内，综合震源机制解 A、B 节面平均走向分别为 30.3°和 300.5°（图 2）；单震震源机制解的优势走向在 30°和 300°左右。这两组震源机制解反映出地震破裂方向具有很好的一致性。而在区域范围内，现代地震构造优势走向也为北东向和北西向两组；现代有感地震范围长轴走向优势分布方向为北东向和北西向两组，大致分别为 30°—40°和 310°左右。研究区的现代地震主要沿北东（30°）和北西（300°—310°）两个

方向破裂或错动，具有沿原有地震断裂继承性破裂或错动的特点。根据震源机制解两个节面错动性质的分析，北东向断裂以右旋走滑或近走滑为主；而北西向断裂则以左旋错动或近走滑为主，这与地质上的构造错动性质一致。

区域构造应力场与震源破裂性质是烟台市及其邻近地区主要断裂地震危险性评价必须考虑的重要因素。

2 烟台市及其邻近地区断裂和地震活动特征

断裂和地震活动特征、活动断裂与地震活动的关系研究是烟台市及其邻近地区主要断裂地震危险性评价的基础。笔者在分析和吸收了“烟台市活断层探测与地震危险性评价”²、“山东半岛北部近海地震区划”³、前人的研究成果，以及笔者多年调查研究资料后，编制了烟台市及其邻近地区活动断裂和地震分布图（图3），旨在为活动断裂地震危险性（控震能力）评价提供基础依据。



断裂名称
 ① 莱北断裂 ② 营潍东支东断裂 ③ 营潍东支西断裂 ④ 景芝断裂 ⑤ 招远—平度断裂 ⑥ 黄县断裂 ⑦ 玲珑—北沟断裂 ⑧ 凤仪店断裂 ⑨ 黄县弧形断裂
 ⑩ 栖霞断裂 ⑪ 刘家亭断裂 ⑫ 蓬莱—威海断裂 ⑬ 桃村断裂 ⑭ 郭城—观水断裂 ⑮ 即墨—唐家庄断裂 ⑯ 沧口断裂 ⑰ 朱吴断裂 ⑱ 海阳断裂
 ⑲ 乳山断裂 ⑳ 神道口断裂 ㉑ 城南河断裂 ㉒ 福山断裂 ㉓ 庙3号断裂 ㉔ 大砬岛—威海北断裂 ㉕ 千里岩断裂 ㉖ 东殿后断裂 ㉗ 米山断裂

图3 烟台市及其邻近地区活动断裂与 $M_s \geq 4\frac{3}{4}$ 级地震（公元495年—2013年12月）震中分布图

Fig. 3 Distribution of active faults and earthquakes with $M_s \geq 4\frac{3}{4}$ in Yantai city and its adjacent area from A.D 495 to 2013

2.1 断裂活动特征

如图3所示，烟台市及其邻近地区的主要断裂有莱北断裂、营潍东支东断裂、营潍东支

西断裂、大矾岛-威海北断裂、长岛-芝罘岛断裂、千里岩断裂、黄县弧形断裂、玲珑-北沟断裂、沧口断裂、桃村断裂、海阳断裂等 27 条断裂。综合地震地质、深部构造、地球物理探测、探槽开挖、断层活动性鉴定和地震活动性等研究成果，笔者将 27 条断裂的基本特征列于表 1 中，并综合分析了烟台市及其邻近地区主要断裂的活动特征。

表 1 烟台市及其邻近地区主要活动断裂特征、探查方法和判定依据一览表

Table 1 List of active faults, exploration methods and workloads along faults (fault zones) in Yantai city and its adjacent area

序号	断裂名称	走向 (°)	长度 km	活动时代	地震震级	调查、探测和鉴定方法	工作量和判定依据
1	莱北断裂	近 EW	50	Q ₁₋₂		石油勘探、工程钻探	收集资料 2 条 (吕悦军等, 2003)
2	营潍东支东断裂	NNE	85	Q ₃		石油勘探、工程钻探	收集资料 2 条、声波探测 2 条 (吕悦军等, 2003; 王志才等, 2006b)
3	营潍东支西断裂	NNE	50	Q ₄		石油勘探、声波探测	收集资料 2 条、声波探测 3 条 (胡政等, 1993; 王志才等, 2006b)
4	景芝断裂	NNE	60	Q ₁₋₂		地质调查、SEM 鉴定	考察点 3 个、SEM 样品 2 个 (王华林, 2009)
5	招远-平度断裂	NE	60	Q ₁₋₂	4 ^{3/4}	地质调查、地质雷达和电法探测、热释光、SEM 鉴定	考察点 7 个、地质雷达 1 条、电法 2 条、热释光 2 个、SEM 样品 2 个 (郭玉贵等, 2005)
6	黄县断裂	EW	40	Q ₃		地质调查、探槽开挖、工程探测、电法探测、热释光、SEM 鉴定	考察点 16 个、探槽 1 个、工程探测 4 条、电法 3 条、热释光 5 个、SEM 样品 2 个 (晁洪太等, 2001; 郭玉贵等, 2005)
7	玲珑-北沟断裂	NNE	50	Q ₃ 、Q ₁₋₂	5	地质调查、探槽开挖、声波探测、测热释光、SEM 鉴定	考察点 5 个、声波探测 1 条、热释光 5 个、SEM 样品 6 个 (晁洪太等, 2001; 郭玉贵等, 2005)
8	凤仪店断裂	NS	65	Q ₁₋₂		地质调查、声波探测、地质雷达和电法探测热释光、SEM 鉴定	考察点 5 个、声波探测 1 条、地质雷达 1 条、电法 1 条、热释光 2 个、SEM 样品 2 个 (晁洪太等, 2001; 郭玉贵等, 2005)
9	黄县弧形断裂	NNE	45	Q ₃		地质调查、探槽开挖、工程探测、地质雷达和电法探测、热释光、SEM 鉴定	考察点 3 个、探槽 2 个、地质雷达 2 条、电法 3 条、热释光 3 个、SEM 样品 3 个 (王华林等, 2008)
10	栖霞断裂	NS	90	Q ₁	5 ^{1/2}	地质调查、SEM 鉴定	考察点 6 个、SEM 样品 2 个。作者。
11	刘家亭断裂	NNE	65	Q ₁₋₂	4 ^{3/4}	地质调查、地质雷达、声波探测、热释光、SEM 鉴定	考察点 6 个、地质雷达 2 条、声波探测 1 条、热释光 4 个、SEM 样品 2 个 (王华林, 2010)
12	长岛-芝罘岛断裂带	280—300	75	Q ₃	4 ^{3/4}	地质考察、声波探测、热释光、SEM 鉴定	考察点 4 个、声波探测 5 条 (长度 120km) (王志才等, 2006a)
13	桃村断裂	NNE	175	Q ₁₋₂	5 ^{1/4}	地质调查、探槽开挖、声波探测、工程探测、地质雷达和电法探测、热释光、SEM 鉴定	考察点 8 个、探槽开挖 1 个、声波探测 2 条、工程探测 6 条、地质雷达 4 条、热释光 6 个、SEM 鉴定 5 个 (晁洪太等, 2001)
14	郭城-观水断裂	NNE	60	Q ₁₋₂		地质调查、热释光、SEM 鉴定	考察点 5 个、热释光 3 个、SEM 鉴定 2 个 (晁洪太等, 2001)

续表

序号	断裂名称	走向(°)	长度 km	活动 时代	地震 震级	调查、探测和鉴定方法	工作量和判定依据
15	即墨-唐家庄 断裂	NNE	80	Q ₁₋₂		地质调查、探槽开挖、工程探测、地震探测和电法探测、热释光、SEM 鉴定	考察点 13 个、探槽开挖 1 个、地震探测 4 条、电法探测 2 条、热释光 6 个、SEM 鉴定 2 个(郭玉贵等, 2005)
16	沧口断裂	NNE	82	Q ₃ 、Q ₁₋₂		地质调查、探槽开挖、声波探测、工程探测、地震探测、地质雷达和电法探测、热释光、SEM 鉴定	考察点 15 个、探槽开挖 4 个、声波探测 3 条、工程探测 6 条、地震探测 8 条、地质雷达 3 条、热释光 15 个、SEM 鉴定 3 个(郭玉贵等, 2007)
17	朱吴断裂	30—50	100	Q ₂		地质调查、声波探测、工程探测、地质雷达热释光、SEM 鉴定	考察点 6 个、声波探测 1 条、工程探测 2 条、地质雷达 2 条、热释光 4 个、SEM 鉴定 3 个(晁洪太等, 2001)
18	海阳断裂	NNE	115	Q ₃ 、Q ₁₋₂	5	地质调查、探槽开挖、声波探测、工程探测、地质雷达和电法探测、热释光、SEM 鉴定	考察点 12 个、探槽开挖 3 个、声波探测 2 条、工程探测 2 条、热释光 8 个、SEM 鉴定 3 个(周本刚等, 2002)
19	乳山断裂	SN	65	Q ₁₋₂	5½	地质调查、热释光、SEM 鉴定	考察点 5 个、热释光 4 个、SEM 鉴定 2 个(王华林, 2009)
20	神道口断裂	NWW	50	Q ₁₋₂	4¾	地质调查、工程探测、声波探测、地震探测和电法探测、热释光	考察点 5 个、探槽开挖 1 个、声波探测 2 条、工程探测 4 条、地震探测 2 条、电法探测 5 条、热释光 16 个(王华林, 1998)
21	城南河断裂	NWW	45	Q ₁₋₂		地质调查、工程探测、声波探测、地震探测和电法探测、热释光	考察点 3 个、探槽开挖 1 个、声波探测 2 条、工程探测 2 条、电法探测 3 条、热释光 7 个(王华林, 1998)
22	福山断裂	NNE	25	Q ₁₋₂		地质调查、地质雷达	考察点 3 个、地质雷达 2 条(王华林, 2010)
23	大竹岛-威海 北断裂	NWW	70	Q ₃	7	声波探测、地层对比、综合分析	声波探测 4 条、地层对比剖面 2 个(王志才等, 2006a)
24	千里岩断裂	NE	80	Q ₃	6¼	声波探测、地层对比、综合分析	声波探测 3 条、地层对比剖面 2 个(王志才等, 2006a)
25	东殿后断裂	EW	20	Q ₃		地质调查、热释光、SEM 鉴定	考察点 5 个、热释光 4 个、SEM 样品 4 个(马保起等, 2004)
26	米山断裂	SN	30	Q ₁₋₂		地质调查、热释光	考察点 8 个、热释光 3 个(王华林等, 2002)
27	阳泉断裂	EW	20	Q ₁₋₂		地质调查、地质雷达、热释光、SEM 鉴定	考察点 3 个、地质雷达 1 条、热释光 2 个、SEM 样品 2 个(王华林, 2010)

(1) 断裂活动的成带、分段和分区特征。沿郯庐断裂带和蓬莱-威海断裂带, 第四纪活动断裂和全新世活动断裂呈现出集中分布的特征, 同时在成带活动的基础上还显示出分段活动的特点。如: 张家口-蓬莱断裂带在西段和中段表现为强活动段, 东段为较强活动段; 同时东段又可以进一步分为西、东两段, 其中东段为弱活动段, 西段为较强活动段。再如: 蓬莱-威海断裂带活动显示由西向东、由强到弱的特点; 潍营断裂带和蓬莱-威海断裂带表现为全新

世和晚更新世斜列成带活动；黄县盆地边界断裂包括黄县弧形断裂、黄县断裂和玲珑-北沟断裂表现为晚更新世活动。

(2) 断裂活动的衰减特征。研究区的断裂活动衰减特征主要反映在蓬莱-威海断裂带旁侧的断裂上，这些断裂的活动强度沿断裂的走向逐渐衰减。其中，蓬莱-威海断裂带南侧的北北东向次级断裂的活动强度由北向南逐渐衰减，如：玲珑-北沟断裂由燕渤断裂向南活动时代从晚更新世向中更新世过渡，垂直位移由大变小。

(3) 断裂的活动时代不同，其活动强度也存在明显的差异。如：营潍东支西断裂为全新世活动断裂；营潍东支东断裂、大矾岛-威海北断裂、长岛-芝罘岛断裂、千里岩断裂、黄县弧形断裂和沧口断裂等 10 条断裂为晚更新世活动断裂；莱北断裂、桃村断裂、招远-平度断裂、海阳断裂、乳山断裂、即墨-唐家庄断裂、日照-胶南断裂等 16 条断裂为早中更新世断裂。

(4) 断裂规模和切割深度存在差异。如：营潍东支西断裂、营潍东支东断裂、大矾岛-威海北断裂、长岛-芝罘岛断裂、千里岩断裂为区域性深大断裂，构成了不同大地构造的分界断裂；桃村断裂、海阳断裂、即墨-唐家庄断裂和海阳断裂为区域性较大断裂；其它断裂的规模相对较小。

(5) 烟台市及其邻近地区主要断裂的活动时代、规模和切割深度的差异，决定着断裂控震能力的差异。全新世和晚更新世活动断裂对 6 级和 6 级以上地震具有控制作用，这些活动断裂构成了不同构造块体的边界。如：沿大矾岛-威海北断裂曾发生过渤海海峡 1548 年 7 级地震和 1948 年威海北 6 级地震；沿千里岩断裂曾发生过 1932 年南黄海 6¼ 级地震。另外，鲁东块体内部规模较大的断裂对 5—6 级地震也具有控制作用，如：沿桃村断裂曾发生过多次 5—5.5 级地震；沿乳山断裂曾发生过 1939 年乳山 5½ 级地震。

2.2 地震活动特征

从公元 495 年—2013 年 12 月，在烟台市及其邻近地区范围内共发生过 16 次 $M \geq 4\frac{3}{4}$ 级地震，如表 2 所示。其中：4¾—4.9 级地震 7 次；5—5.9 级地震 6 次；6—6.9 级地震 2 次；7—7.9 级地震 1 次，地震震中分布如图 3 所示。从 1970 年—2013 年 12 月，在烟台市及其邻近地区范围内共发生过 $M_L \geq 2.0$ 级地震 1352 次。其中：2.0—2.9 级地震 1129 次；3.0—3.9 级地震 202 次；4—4.9 级地震 21 次；最大地震是 2013 年 11 月 23 日发生在莱州市店子的 4.9 级地震。表 3 为其中 4 级以上地震；图 4 是现代 $M_L \geq 2$ 级地震（公元 1970 年—2013 年 12 月）的震中分布图。

表 2 烟台市及其邻近地区范围内 $M_S \geq 4\frac{3}{4}$ 级地震目录（公元 495 年—2013 年 12 月）

Table 2 Catalogue of earthquakes with $M_S \geq 4\frac{3}{4}$ in Yantai city and its adjacent area from A.D 495 to 2013

发震时间 (年-月-日)	经纬度 (°)	震级	地点	精度	发震时间 (年-月-日)	经纬度 (°)	震级	地点	精度
495-04-01	37.6, 120.9	5½	蓬莱 丘山	5	1621-11-22	37.9, 121.2	5¼	蓬莱 东海域	4
1046-04-24	36.9, 121.4	5	车箱峰 与乳山 寨间	4	1642-08-11	37.2, 120.6	4¾	莱阳北	4
1408-02-28	37.6, 121.1	4¾	蓬莱 东南	4	1686-01-18	37.7, 121.8	4¾	黄海	4
1409-02-13	37.6, 121.1	4¾	蓬莱 东南	4	1687-11-20	37.6, 121.5	4¾	蓬莱 东海域	4

续表

发震时间 (年-月-日)	经纬度 (°)	震级	地点	精度	发震时间 (年-月-日)	经纬度 (°)	震级	地点	精度
1506-09-07	36.3, 120.0	4¾	墨东	1	1736-12-25	37.8, 121.6	5	黄海	4
1548-09-22	38.0, 121.0	7	渤海	5	1932-08-22	36.1, 121.6	6¼	黄海	
1597-12	37.7, 121.6	5¼	福山 海域	5	1939-01-08	37.1, 121.6	5½	乳山县 东北	
1598-02-13	37.4, 121.3	4¾	福山南	3	1948-05-23	37.6, 121.9	6	威海 海中	

表 3 烟台市及其邻近地区范围内 $M_L \geq 4$ 级地震目录 (1970.1—2013.12)Table 3 Catalogue of earthquakes with $M_L \geq 4$ in Yantai city and its adjacent area from 1970 to 2013

序号	年-月-日	北纬 (°)	东经 (°)	震级	震源深度 (km)	地点	备注
1	1976-02-25	38.00	120.52	4.1		长岛县黑山	
2	1978-02-12	37.77	121.15	4.1	21	蓬莱县初家	
3	1980-05-14	37.58	121.90	4.6	18	威海市张村镇	
4	1980-05-19	37.57	121.88	4.1	17	威海市张村镇	
5	1982-03-26	37.08	121.58	4.2	10	乳山县下初	
6	1991-01-07	36.02	121.87	4.2		乳山县南乔	
7	1991-03-14	37.95	121.25	4.5	17	蓬莱县初家	
8	1991-03-14	37.90	121.10	4.7	26	蓬莱县衙前	
9	1993-06-14	37.42	119.93	4.1	10	莱州市三山岛镇	
10	1993-12-31	37.77	122.17	4		威海市孙家疃镇	
11	1997-03-25	36.88	121.62	4.1	10	乳山县白沙滩	
12	1997-09-18	37.98	121.20	4.8	14	蓬莱县初家	
13	2003-06-05	36.23	120.67	4.2	8	青岛市王哥庄镇	
14	2003-06-12	36.23	120.65	4	8	青岛市王哥庄镇	
15	2004-11-01	36.17	120.67	4.1	10	青岛市青山	
16	2005-01—18	36.82	121.43	4.3	7	乳山县乳山口镇	
17	2005-05-09	37.62	121.83	4.5	21	牟平县孙家疃	
18	2005-05-10	37.57	121.9	4	12	威海市张村镇	
19	2007-07-10	37.62	120.95	4.4	18	蓬莱县固寺店	
20	2013-11-23	37.10	120.02	4.9	10	莱州市店子	
21	2013-12-06	38.09	120.07	4.2	13	龙口市	

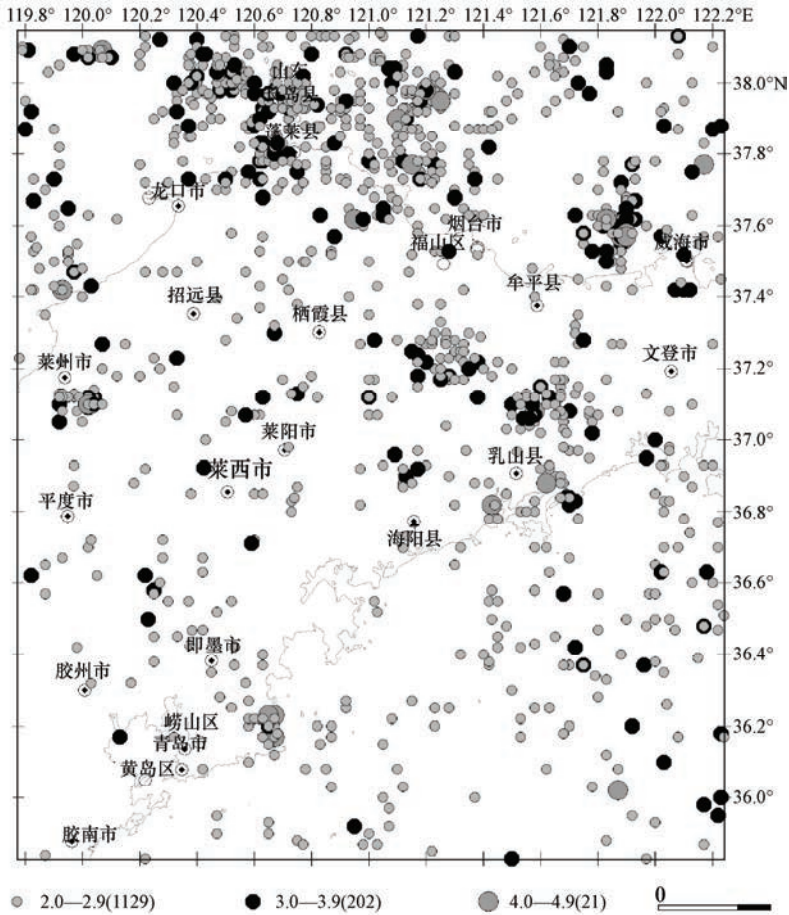


图 4 烟台市及其邻近地区现代 $M_L \geq 2$ 级地震（公元 1970 年—2013 年 12 月）震中分布

Fig. 4 Distribution of earthquakes with $M_L \geq 2$ in Yantai city and its adjacent area from 1970 to 2013

从图 3 并结合上述分析可知，地震活动具有空间分布的不均匀性，中强地震受全新世和晚更新世活动断裂带或规模较大的早中更新世断裂的控制，断裂交汇区域是中强地震发生的有利部位。如烟台市及其邻近地区范围内发生的 16 次 $M \geq 4\frac{3}{4}$ 级地震，主要沿大矾岛-威海北断裂、玲珑-北沟断裂、沧口断裂、神道口断裂、乳山断裂、海阳断裂、栖霞断裂、千里岩断裂和桃村断裂分布。

从地质构造上看，烟台市及其邻近地区范围内 1970 年以来 $M_L \geq 2.0$ 级现代地震，主要分布在大矾岛-威海北断裂、长岛-芝罘岛断裂、玲珑-北沟断裂、沧口断裂、风仪店断裂、栖霞断裂、招远-平度断裂、刘家亭断裂、海阳断裂、桃村断裂和福山断裂等附近。在这些断裂附近地震活动比较活跃，尤以小震活动为主。而 4 级以上地震主要沿大矾岛-威海北断裂、长岛-芝罘岛断裂、栖霞断裂、招远-平度断裂和桃村断裂及其交汇区域分布。

现代小震活动受活动断裂和区域性规模较大断裂控制明显，近场区范围内共有 668 次 $M_L \geq 2.0$ 级地震有深度数据，分别分布在 3—48km 范围内，表 4 给出了这些地震在不同深度

范围内的分布统计结果。

表 4 烟台市及其邻近地区范围内现代地震随深度的分布 (以次数计)

Table 4 Distribution of earthquakes depth in Yantai city and its adjacent area from 1970 to 2013

深度 (km)	1—9	10—14	15—19	20—24	25—29	≥30
地震次数	242	146	127	92	40	21
占总数百分比	36.23%	21.86%	19.01%	13.77%	5.99%	3.14%

从表 4 的统计结果可以看出,近场区范围内的地震都属于浅源地震,平均深度为 14km;震源深度主要分布在 5—24km 范围内,占总数的 94%。区域地震震源深度与华北地区震源深度分布特征基本一致。

2.3 活动断裂与地震活动的关系

烟台市及其邻近地区的活动断裂与地震活动密切相关。断裂的活动时代不同决定着断裂的控震能力不同。断裂规模和切割深度的差异,决定着断裂控震能力的差异性。全新世和晚更新世活动断裂对 6 级以上地震具有控制作用,它们构成了不同构造块体的边界。如:沿构成半岛东部掀斜隆起与长岛-威海坳陷的边界断裂的大矾岛-威海北晚更新世活动断裂,曾发生过渤海海峡 1548 年 7 级地震和 1948 年威海北 6 级地震;沿构成半岛东部掀斜隆起与千里岩-海州湾隆起的边界断裂的千里岩断裂,曾发生过 1932 年南黄海 6¼ 级地震。另外,鲁东块体内部规模较大的早中更新世断裂对 5—6 级地震具有控制作用,如:沿桃村断裂曾发生过多次 5—5.5 级地震;沿乳山断裂曾发生过 1939 年乳山 5½ 级地震。再有活动断裂的交汇区域、断裂的端部或拐弯处是应力集中和地震发生的有利部位,如:在大矾岛-威海北断裂和长岛-芝罘岛断裂与桃村断裂交汇区域曾发生过多次 5—6 级地震;在刘家亭断裂北端曾发生过 1408 年 4¾ 级地震;在栖霞断裂北端曾发生过 495 年蓬莱丘山 5½ 级地震。

3 主要活动断裂地震危险性评价

根据地震构造背景、构造应力场和震源破裂性质,烟台市及其邻近地区断裂和地震活动特征以及活动断裂与地震活动的关系等研究成果,利用定性、定量和综合判定的方法,本文对烟台市及其邻近地区主要活断裂的地震危险性进行了以下综合评价。

3.1 主要活动断裂控震能力的定性估计

活动断裂控震能力的定性估计主要考虑活动断裂的历史地震活动情况和不同时代断层及其控震能力的研究成果两个方面。如表 2 和图 3 给出了烟台市及其邻近地区活动断裂的历史地震活动情况,这就为主要活动断裂控震能力的定性估计提供了依据。

根据华北地区和山东及其邻近地区断裂活动时代与断层控震能力关系的研究结果(晁洪太等,1998),可发现不同活动时代断层具有明显的不同的控震能力。如:华北和山东及其邻近地区全新世晚期活动断裂主要控制 7.0—8.5 级地震的发生;晚更新世活动断裂对 6.0—7.0 级地震有明显的控制作用;早、中更新世活动断层对 5.0—6.0 级地震有明显的控制作用。根据断裂的历史地震活动情况和不同时代断层及其控震能力的研究成果,笔者在表 5 中列出了定性评价的烟台市及其邻近地区主要活动断裂的控震能力。

表 5 主要活动断裂地震危险性（控震能力）评价结果

Table 5 The results from seismic risk assessment on active faults in Yantai city and its adjacent area

序号	断裂名称	分段	活动时代	分段长度 (km)	定量估计震级				定性估计控震能力	综合评判结果
					公式 1	公式 2	平均值	折算震级		
1	莱北断裂		Q ₁₋₂	50					5.5	5.5
2	营潍东支东断裂		Q ₃	85	7.58	7.31	7.45	6.33	6.5	7.0
3	营潍东支西断裂		Q ₄	50	7.07	6.96	7.01	7.01	7	7.5
4	景芝断裂		Q ₁₋₂	60					5.5	5.5
5	招远-平度断裂		Q ₁₋₂	60					5.5	5.5
6	黄县断裂		Q ₃	40	6.85	6.81	6.83	5.81	6	6.5
7	玲珑-北沟断裂	南段	Q ₁₋₂	20					5	5.0
		北段	Q ₃	30	6.58	6.61	6.59	5.61	6	6.5
8	凤仪店断裂		Q ₁₋₂	65					5.5	5.5
9	黄县弧形断裂		Q ₃	45	6.97	6.89	6.93	5.89	6	6.5
10	栖霞断裂		Q ₁₋₂	90					5.5	5.5
11	刘家亭断裂		Q ₁₋₂	65					5.5	5.5
12	长岛-芝罘岛断裂		Q ₃	75	7.46	7.23	7.34	6.24	6.5	7.0
13	桃村断裂	北段	Q ₁₋₂	65					5.5	5.5
		南段	Q ₁₋₂	110					5.5	6.0
14	郭城-观水断裂		Q ₁₋₂	60					5.5	5.5
15	即墨-唐家庄断裂		Q ₁₋₂	80					5.5	5.5
16	沧口断裂		Q ₃ 、Q ₁₋₂	82	7.54	7.28	7.42	5.56	6	6.5
17	朱吴断裂		Q ₁₋₂	100					5.5	5.5
18	海阳断裂	北段	Q ₁₋₂	70					5.5	5.5
		中段	Q ₃	20					5.5	6.0
		南段	Q ₁₋₂	25					5	5.0
19	乳山断裂		Q ₁₋₂	65					5.5	6.0
20	神道口断裂		Q ₁₋₂	50					5.5	5.5
21	城南河断裂		Q ₁₋₂	45					5.5	5.5
22	福山断裂		Q ₁₋₂	25					5	5.0
23	大矾岛-威海北断裂		Q ₃	70	7.40	7.18	7.29	6.19	7	7.0
24	千里岩断裂		Q ₃	80	7.52	7.28	7.40	6.29	6.5	7.0
25	东殿后断裂		Q ₃	20	6.18	6.34	6.26	5.32	6	6.0
26	米山断裂		Q ₁₋₂	30					5	5.0

3.2 主要活动断裂地震上限的定量估计

利用邓起东等（1992）和 Wels 等（1994）对断层长度与地震震级关系的研究结果，笔者

选取地震断裂长度与地震震级进行统计分析, 通过回归分析可得到二者的统计关系, 然后再用其估计其它地震断层的震级上限。显而易见, 这些统计关系只能用于全新世地震断层震级上限的估计。

对于晚更新世活动断裂如何利用上述统计关系进行震级上限的估计, 需要考虑全新世活动断裂与晚更新世活动断裂控震能力的差异性。根据华北地区和山东及其邻近地区断裂活动时代与断层控震能力关系的研究结果(晁洪太等, 1998), 使我们有可能将前人得到的断裂长度与地震震级统计关系用于晚更新世活动断裂震级上限的估计成为可能。具体的处理方法是, 首先给出晚更新世活动断裂控震能力的震级上限和区间, 然后根据它们之间的比值关系(折算系数)进行晚更新世活动断裂最大震级上限的估计。

笔者给出了山东及其邻近地区全新世和晚更新世活动断裂控震能力及其比值之间的关系, 如表 6 所示。具体的做法是首先根据断裂长度与地震震级统计关系计算全新世和晚更新世活动断裂段的震级上限, 再根据断裂活动时代给出折算系数(比值), 用计算获得的震级上限乘以折算系数就可得到晚更新世活动断裂的震级上限, 并以此来估计晚更新世活动断裂(段)的控震能力(震级上限)。

表 6 全新世和晚更新世活动断裂的控震能力折算系数

Table 6 Conversion rate of controlling seismic intensity along active faults of Holocene and late Pleistocene

断裂活动时代	控震能力区间(均值)	折算系数(比值)
Q ₄	7.0—8.5 (7.7)	1
Q ₃	6.0—7.0 (6.5)	0.85

考虑到早中更新世断裂自晚更新世以来不再发生断错地表的地震事件, 笔者根据地震重复和构造类比的原则来确定早中更新世断裂(段)的控震能力(震级上限)。地震重复原则主要依据沿断裂发生的最大地震来确定断裂的控震能力; 构造类比原则主要考虑断裂长度、切割深度、断裂与区域构造应力场的关系和深部构造条件等因素。

根据以上思路, 笔者选取邓起东等(1992)得出的华北地区的统计公式(1)和 Wels 等(1994)的关系式(2):

$$M=3.295+2.221 \times \lg L \quad R=0.975 \quad S=0.115 \quad (1)$$

$$M=4.34+1.54 \times \lg L \quad (2)$$

式中, L 为活动断层的分段长度; M 为估算的最大潜在地震震级; R 为相关系数; S 为方差。

利用表 5 所列出的主要活动断裂(段)的长度, 计算获得每条全新世和晚更新世活动断裂(段)震级上限的平均值(表 5)。再根据表 5 所列出的主要活动断裂(段)的活动时代和表 6 给出的全新世和晚更新世活动断裂的控震能力折算系数, 用震级上限的平均值乘以折算系数就可得到不同活动时代断裂(段)的震级上限(折算震级)。具体计算结果如表 5 所示。

3.3 主要活动断裂地震危险性评价的综合评判

根据上述主要活动断裂地震控震能力的定性估计和定量估计结果, 在充分考虑了地震构造背景、构造应力场特征和震源破裂性质后, 笔者得到了烟台市及其邻近地区断裂和地震活

动特征以及断裂与地震活动的关系，并综合评判了烟台市及其邻近地区主要断裂的地震危险性评价结果（见表 5 和图 5）。由表 5 和图 5 可见，营潍东支西断裂的最大震级为 7.5；大矾岛-威海北断裂、长岛-芝罘岛断裂、营潍东支东断裂和千里岩断裂的最大震级为 7.0；黄县弧形断裂、黄县断裂、玲珑-北沟断裂北段、沧口断裂的最大震级为 6.5；东殿后断裂、海阳断裂中段、乳山断裂、桃村断裂南段的最大震级为 6.0；莱北断裂、城南河断裂、神道口断裂、朱吴断裂、即墨-唐家庄断裂、郭城-观水断裂、海阳断裂北段、桃村断裂北段、凤仪店断裂、刘家亭断裂、景芝断裂等的最大震级为 5.5；玲珑-北沟断裂南段、海阳断裂南段、福山断裂、米山断裂的最大震级为 5.0。

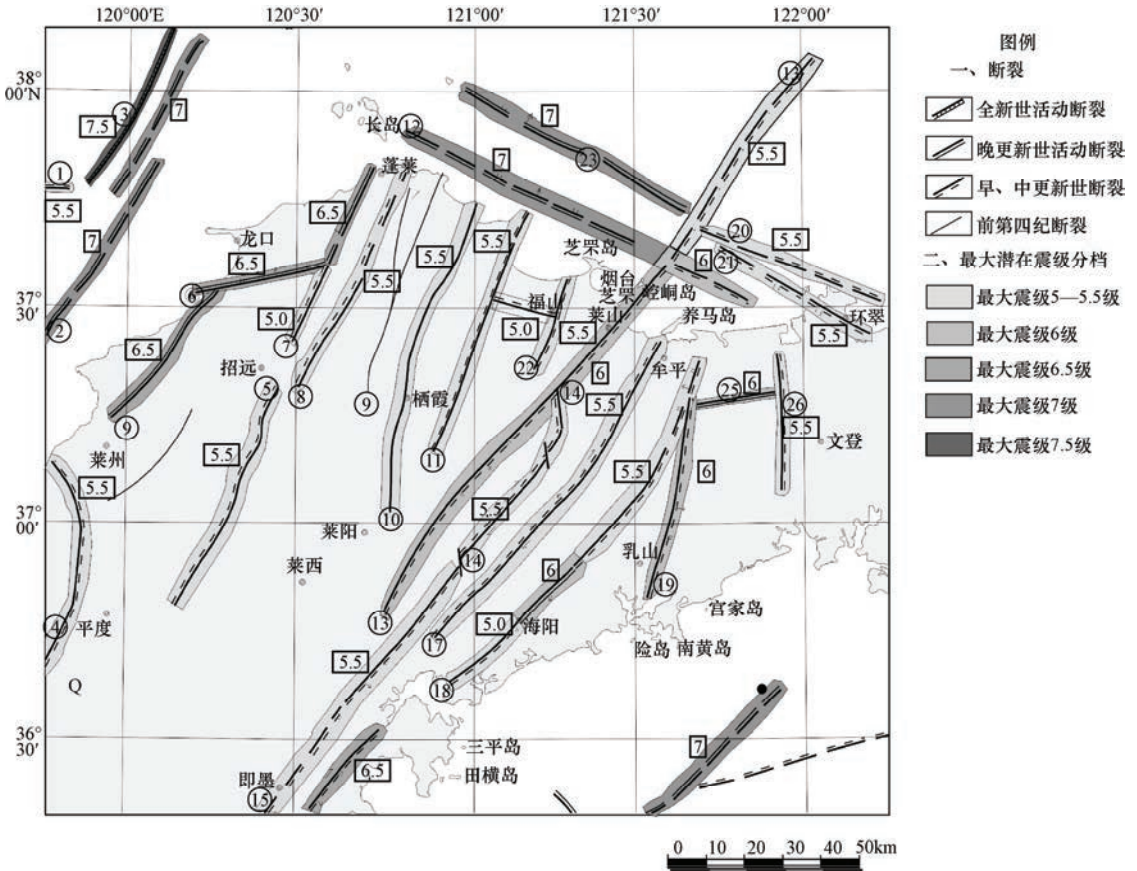


图 5 烟台市及其邻近地区活动断裂地震危险性评价图

Fig. 5 Map of the seismic risk along active faults in Yantai city and its adjacent area

4 主要结论与认识

(1) 渤海强震构造区、蓬莱-威海断裂带和鲁东地块区内的北东向和近东西向活动断裂带对烟台市及其邻近地区地震危险性有重要影响。渤海强震构造区和蓬莱-威海断裂带是区域性的重力、航磁、地热、形变和壳幔结构的综合地球物理异常带。烟台市区及其邻近地区位于区域性北西西向地壳、上地幔变异带和航磁、重力、地热梯度带范围内，受北东向断裂影响梯度带向北东向发生扭曲畸变。本地区构造运动与形变的主要驱动力为：青藏高原北东方向

的推挤力,太平洋板块向欧亚板块俯冲对华北地壳产生的西向推挤力,以及地壳上隆所产生的北西-南东方向的扩张力。在这三种力的联合作用下,形成了北东东-南西西向挤压的现代构造应力场,并导致北东 30° 和北西 300° — 310° 两个方向的破裂或错动。北东向断裂以右旋走滑或近走滑为主;而北西向断裂则以左旋错动或近走滑为主。北东 30° 和北西 300° — 310° 两个方向的破裂构成了本区中、强地震的发震构造。

(2) 烟台市及其邻近地区的活动断裂与地震活动密切相关。断裂的活动时代不同决定着断裂的控震能力不同。断裂规模和切割深度的差异,决定着断裂控震能力的差异性。全新世和晚更新世活动断裂对6级和6级以上地震具有控制作用,这些活动断裂构成了不同构造块体的边界。鲁东块体内部规模较大的早中更新世断裂对5—6级地震具有控制作用。

(3) 在对区域地震构造背景、构造应力场和震源破裂性质,以及烟台市及其邻近地区断裂和地震活动特征研究的基础上,笔者甄别出了具有发生破坏性地震的活断层段。同时根据前人对断层长度与地震震级的统计关系,以及华北地区和山东及其邻近地区断裂活动时代与断层控震能力关系的研究结果,笔者采用定性、定量和综合的方法,评价了烟台市及其邻近地区主要断裂的地震危险性(控震能力),编制了烟台市及其邻近地区活动断裂地震危险性评价图。

(4) 本文将断裂活动时代与断裂控震能力,以及地震断层长度与地震震级的统计关系的研究成果相结合,提出了定性与定量相结合判定不同活动时代断裂最大震级的危险性评价方法。这一研究思路和方法具有一定的推广和应用价值。

综上所述,本文的研究成果对认识地震孕育和发生的成因机理、构造动力学环境与强震活动的关系、断裂和地震的活动规律、烟台市及其邻近地区的潜在震源区判定,以及胶东半岛地区的地震监测预报、区划性地震区划、震害预测和断层危害性评价具有重要的理论和实际意义。

参考文献

- 晁洪太,王锜,李家灵等,1997.山东省地震构造图、山东省新构造图及说明书(1:100万).济南:山东省地图出版社.
- 晁洪太,李家灵等,1998.不同活动时代断层的控震能力及其潜在震源区的震级上限.见:中国地震区划学术讨论会文集.北京:地震出版社,57—62.
- 晁洪太,王志才,刘西林等,1999.郯庐断裂带下辽河莱州湾段与潍坊嘉山段地震构造和地震活动特征对比.华北地震科学,17(2):36—62.
- 晁洪太,于慎谔,李家灵等,2001.山东半岛地区活断层研究.东北地震研究,17(4):1—8.
- 邓起东,于贵华,叶文华等,1992.地震地表破裂参数与震级关系的研究.见:活动断裂研究(2).北京:地震出版社.
- 方仲景,丁梦林,向宏发等,1987.郯庐断裂带.北京:地震出版社.
- 郭玉贵,王红霞,邓志辉等,2005.山东沿海及近海地震分形分析.地球物理学进展,20(1):155—159.
- 郭玉贵,丁志峰,邓志辉等,2007.青岛沧口断裂的地质构造特征与第四纪活动性研究.震灾防御技术,2(2):102—114.
- 黄培华,傅容珊,1983.中国岩石层底面地幔对流状态的讨论.地球物理学报,26(1):39—47.
- 胡政,丁东,1993.郯庐断裂带莱州湾段的构造特征.西北地震学报,15(1):75—81.

- 李家正, 刘敬宽, 1983. 华北地区重磁场特征与地震的关系. 地震科学研究, **6**: 19—22.
- 李钦祖, 1980. 华北地壳应力场的基本特征. 地球物理学报, **23** (4): 376—387.
- 李西双, 刘保华, 赵月霞等, 2010. 渤海海域晚更新世-全新世的活动构造. 海洋学报, **32** (5): 52—59.
- 刘光夏, 张先, 贺为民等, 1996. 渤海及其邻区居里等温面的研究. 地震地质, **18** (4): 398—402.
- 吕悦军, 彭艳菊, 沙海军等, 2003. 渤南油田工程地震研究. 北京: 地震出版社.
- 马保起, 舒赛兵, 刘光勋, 2004. 山东半岛东北部新发现近 EW 向活断层. 地震地质, **26** (4): 638—644.
- 马杏垣主编, 1987. 中国岩石圈动力学纲要, 1: 400 万中国及邻近海域岩石圈动力学图说明书. 北京: 地质出版社.
- 马杏垣主编, 1989. 中国岩石圈动力学图集. 北京: 地图出版社.
- 王华林主编, 1998. 活动断裂探测与地震区划研究. 北京: 地震出版社.
- 王华林, 2000. 渤海及周围地区断裂构造与强震活动研究. 地震研究, **23** (1): 35—43.
- 王华林, 王涛, 2002. 黄山-米山断裂活动性及其对米山水库稳定性影响的评价. 山东地质, **18** (1): 26—31.
- 王华林, 王纪强, 盖殿广等, 2008. 黄县弧形断裂探测、活动性鉴定及其地震地质意义. 震灾防御技术, **3** (4): 436—450.
- 王晓青, 1988. 沂沭断裂深部构造研究. 中国地震, **4** (3): 23—28.
- 王志才, 邓起东, 晁洪太等, 2006a. 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. 地球物理学报, **49** (4): 1092—1101.
- 王志才, 邓起东, 杜宪宋等, 2006b. 莱州湾海域郯庐断裂带活断层探测. 地震学报, **19** (5): 493—503.
- 汪一鹏, 1979. 我国板内地震和中新代应力场. 地震地质, **1** (3): 1—11.
- 魏梦华, 1980. 根据重力资料分析华北地区地壳结构的基本特征及其与地震的关系. 地震地质, **2** (2): 55—60.
- 魏光兴, 刁守中, 周翠英等, 1993. 郯庐带地震活动性研究. 北京: 地震出版社.
- 许忠淮, 阎明, 赵仲和, 1983. 由多个小地震推断的华北地区构造应力场的方向. 地震学报, **5** (3): 268—279.
- 解政文, 1980. 渤海及其邻近地区热流值初步分析. 地震地质, **2** (3): 57—64.
- 叶洪, 张文郁, 1980. 初论华北板内地震断层特征及其与地壳、上地幔动力学过程的关系. 地震地质, **2** (1): 27—38.
- 张静华, 2004. 用 GPS 测量结果研究华北现今构造形变场. 大地测量与地球动力学, **24** (3): 40—46.
- 张碧秀, 汤永安, 1988. 沂沭断裂带地壳结构特征. 中国地震, **4** (3): 16—22.
- 张培震, 王琪, 马宗晋, 2002a. 中国大陆先进构造运动的 GPS 速度场与活动地块. 地学前缘, **9** (2): 430—441.
- 张培震, 王琪, 马宗晋, 2002b. 中国大陆先进构造运动的 GPS 速度场与活动地块. 地学前缘, **9** (2): 430—441.
- 周本刚, 董瑞树, 环文林等, 2002. 山东海阳断裂东石兰沟段晚更新世以来地表断错特征与最大潜在地震估计. 地震地质, **26** (2): 159—166.
- 周翠英, 张宇霞, 1992. 山东地区近期地震应力背景分析. 地震, **4**: 54—61.
- 周玖, 1983. 青藏高原重力构造. 地质科学, (4): 345—353.
- Wels D.L. and Coppersmith K.J., 1994. New empirical relationship among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement. Bulletin of the Seismological Society of America, **84** (4): 974—1002.

The Seismic Risk Assessment on Active Faults in Yantai City and Its Adjacent Area

Wang Hualin, Hu Chao, Wang Jiqiang, Chen Ping and Liu Xia

(Shandong Institute of Seismic Engineering, Jinan 250021, China)

Abstract In this paper summarized some research results in the project of seismic activity regularities and seismic hazard zone determination along middle segment of Tanlu seismic fracture zone. Through analysis and research of the qualitative and quantitative data of seismo-tectonic environment, depth structure background and active faults that were gained from studies of seismic-geology, geophysical survey, trenching and activity determination, we have identified the active fault segments which is capable of producing disastrous earthquakes and presenting the seismic risk in Yantai city and its adjacent area, by using qualitative, quantitative and synthetic methods. The results provided basis for earthquake monitoring and prediction, seismic micro-division, seismic disaster forecasting and fault harm assessment in Jiaodong Peninsula.

Key words: Active fault; Determination methods; Maximum seismic intensity; The seismic risk assessment; Yantai City and Its adjacent area