

沙海军,吕悦军,彭艳菊,等. 2024. 渤海及邻区地震活动的周期性特征及其在地震预测中的应用. 中国地震, 40(4):868~876.

# 渤海及邻区地震活动的周期性特征 及其在地震预测中的应用

沙海军<sup>1,2)</sup> 吕悦军<sup>1,2)</sup> 彭艳菊<sup>1,2)</sup> 谢卓娟<sup>1,2)</sup> 修立伟<sup>1,2)</sup>

1) 应急管理部国家自然灾害防治研究院, 北京 100085

2) 复合链生自然灾害动力学应急管理部重点实验室, 北京 100085

**摘要** 本研究使用最大熵谱分析方法对渤海及邻区的历史地震资料进行统计分析,揭示该地区地震活动的周期性特征。研究结果显示,渤海及邻区的地震序列具有一定的周期性特征,其优势周期分布在29~36a之间;自公元1517年以来可划分为16个地震活动期,目前,该地区处于地震平静期的中期。此外,对各个地震期内的地震次数进行统计分析,估算了地震活动的平均水平。

**关键词:** 渤海 地震活动 周期性 最大熵谱分析 地震预测

[文章编号] 1001-4683(2024)04-0868-09 [中图分类号] P315 [文献标识码] A

## 0 引言

渤海海域是我国东部地震活动性较高的地区。自公元1493年以来,在该地区共记录到7级以上大地震4次,平均120年发生1次(环文林等,1989)。环渤海地区近代发生多次强震,其中包括1975年海城7.3级地震和1976年唐山7.8级地震。环渤海地区分布有多个经济发达、人口稠密的重要城市,如天津、唐山和大连等,一旦渤海地区发生强烈地震,将有可能造成巨大的人员伤亡和财产损失。

前人对渤海及邻区的地震活动特征进行了深入研究,这些研究主要集中在对渤海地区的地震活动和相关地震构造的定性分析(环文林等,1989;刁守中等,1990;金安忠等,1990;杨港生等,2000;吕悦军等,2003;陈国光等,2004;王健,2007;曹凤娟等,2012;谢卓娟等,2016;高战武等,2021),而鲜有对该地区地震活动周期性的相关分析和研究。对地震活动周期性的理解,有利于更好地估计未来强震发生的时间段,对地震预测研究等工作具有指导意义。

最大熵谱分析方法是一种分析地震活动周期性的常用方法,前人对该方法已经开展过很多研究工作。例如,张郢珍等(1985)利用最大熵谱法研究了华北第三、四活动期的周期性;王锜等(1988)使用最大熵谱法等方法估计了华北地震活动的基本周期;黄玮琼等

[收稿日期] 2023-11-14 [修定日期] 2024-06-03

[项目类别] 中央级公益性科研院所基本科研业务专项(ZDJ2017-14)资助

[作者简介] 沙海军,男,1976年生,副研究员,主要从事地震活动与危险性研究。E-mail:shjshare@163.com



本次研究使用的历史地震资料主要来源于《中国历史强震目录(公元前23世纪—公元1911年)》(国家地震局震害防御司,1995)、《中国近代地震目录(公元1912—1990年 $M_s \geq 4.7$ )》(中国地震局震害防御司,1999)和中国地震台网中心汇编的《中国地震台网统一地震目录》。自有记录以来至2022年,研究区内共记录到 $M \geq 5.0$ 地震96次,其中8.0级地震1次,7.0~7.9级地震8次,6.0~6.9级14次。

据黄玮琼等(1988)的研究结果,研究区陆域自1484年以来 $M \geq 5.0$ 地震基本完整。研究区海域包括整个渤海海域和部分黄海海域,最早记录到的历史地震为1046年黄海 $5\frac{1}{2}$ 级地震。研究区海域在1500—1600年间陆续记录到7次5级以上地震(其中5~ $5\frac{1}{2}$ 级地震4次),发震频率远大于1500年之前(1046—1499年间仅有3次地震记录),结合渤海和黄海沿岸地区的史料记载,显示1500年以来研究区已经分布有一定数量的居民点,并开始记录到历史地震的影响。同时,考虑渤海海域和研究区内黄海海域的离岸距离一般在130km以内,而5级以上地震的有感半径在150km以上(汪素云等,2000),推断研究区海域的大部分5级以上地震能够在沿岸地区产生震感。综上所述,可以判断研究区1500年以来的5级以上地震资料已经具备初步的完整性,但5级左右地震在海域或人烟稀少地区会有一定缺失。

根据研究区历史地震资料的完整性情况,拟以该区1500—2022年的历史地震目录为基础数据,对该区的地震活动周期性进行研究。

## 2 最大熵谱分析方法

最大熵谱分析方法是一种非线性谱估计方法,又称为最大熵谱估计方法。该方法根据时间序列在已知有限时间点上的自相关函数值保持不变,并按照最大熵准则将未知时间点的自相关函数进行外推,从而获得时间序列的功率谱密度估计。这种方法的优点在于能够获得分辨率较高的功率谱估计,特别适用于短时间序列。

由于直接计算自相关函数较为困难,Burg(1975)提出了一种递推算法,可以直接根据已知的时间信号序列计算功率谱估值。Burg(1975)的算法大大简化了谱估计的计算工作,使得最大熵谱分析方法得以广泛应用于各个领域,包括时间序列周期性分析、语音信号和图像处理等。

Burg算法通过迭代计算自相关函数和谱估值,最终得到功率谱估值。具体步骤如下:①初始化:设定初始的自相关函数值和谱估值;②递推计算自相关函数:根据已知的时间信号序列和当前的自相关函数值,递推计算出新的自相关函数值;③递推计算谱估值:根据当前的自相关函数值和谱估值,递推计算出新的谱估值;④迭代更新:重复执行步骤2和步骤3,直到自相关函数值收敛或达到预设的迭代次数。Burg算法已有成熟的计算程序可用,例如Matlab软件中Pburg函数可以直接用来估算时间序列的功率谱,故本文不再详述有关的公式推理和实现过程。

在求解时间序列周期的应用中,最大熵谱分析方法可以通过分析时间序列的功率谱频率成分,进而确定时间序列的周期,具体来说,是根据熵谱峰值处对应的频率或周期,来确定时间序列的周期(安鸿志等,1983)。

## 3 渤海及邻区地震序列及其周期性分析

本研究以渤海及邻区1500—2022年 $M \geq 5.0$ 地震目录作为研究资料,建立地震序列,使

用最大熵谱分析方法求解该地震序列的功率谱,进而分析地震序列的周期性。

### 3.1 渤海及邻区地震序列

1500—2022 年渤海及邻区共记录到  $M \geq 5.0$  地震 85 次,其中,8.0 级地震 1 次,7.0~7.9 级地震 7 次,6.0~6.9 级地震 13 次,5.0~5.9 级地震 64 次。

为进行统计分析,参考黄玮琼等(1988)的处理方法,对地震震级时间序列做如下处理:每 3 年取 1 次样,取每个时间段中最大的地震震级作为样本值  $x_i (i=1,2,\dots,n)$ ,无地震时补一个震级为 3.0 的地震;然后,对序列  $x_i$  作不等权平均滑动处理;以 3 点为一个滑动窗长,1 点为滑动步长,得出新的数字序列  $x'_i = (x_i + 2x_{i+1} + x_{i+2})/4$ ;在原序列  $x_i$  前后各插入  $x_0 = 3$  和  $x_{n+1} = 3$ ,新序列  $x'_i$  的数据长度仍为  $n$ ;最后,还需要将序列  $x'_i$  变成一个零均值序列  $x''_i$ ,  $x''_i = x'_i - \bar{x}'_i$ ,  $\bar{x}'_i$  为  $x'_i$  的平均值。地震  $M-t$  图和零均值序列  $x''_i$  如图 2 所示。

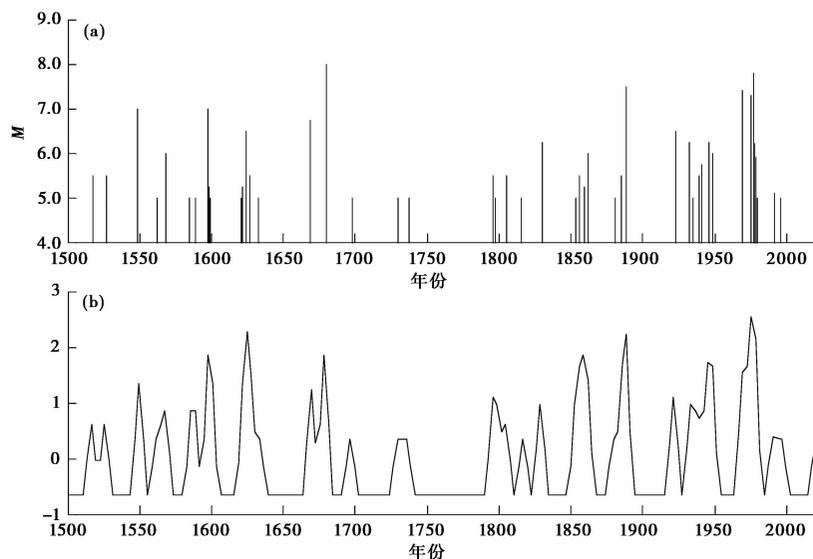


图 2 渤海及邻区  $M-t$  图(a)和地震序列  $x''_i$ (b)

### 3.2 地震序列的功率谱密度估计

为了反映在不同时段地震序列的周期规律性,按全时段(1500—2022 年)、等分的 2 个时段(1500—1761 年和 1762—2022 年),共 3 个时段进行地震序列的统计分析。

不同时段功率谱估计结果如图 3 所示。其中,图 3(a)显示研究区 1500—1761 年地震序列的功率谱计算结果,从图中可以看出该时段主要存在 4 个明显的功率谱峰值,峰值从高到低对应的周期分别为 35.7a、26.0a、18.5a 和 11.9a;图 3(b)显示研究区 1762—2022 年地震序列的功率谱计算结果,可以看这一时段出主要存在 1 个明显的功率谱峰值,对应的周期为 29.5a;图 3(c)显示研究区 1500—2022 年地震序列的功率谱计算结果,可以看出该时段主要存在 2 个明显的功率谱峰值,对应的周期分别为 306.6a 和 29.5a。

### 3.3 周期性分析

由图 3 可见,功率谱密度峰值对应的显著周期主要在 29~36a 之间,特别是 1762—2022 年和 1500—2022 年 2 个时段均存在对应于 29.5a 的峰值;另外,1500—2022 年时段还有 1

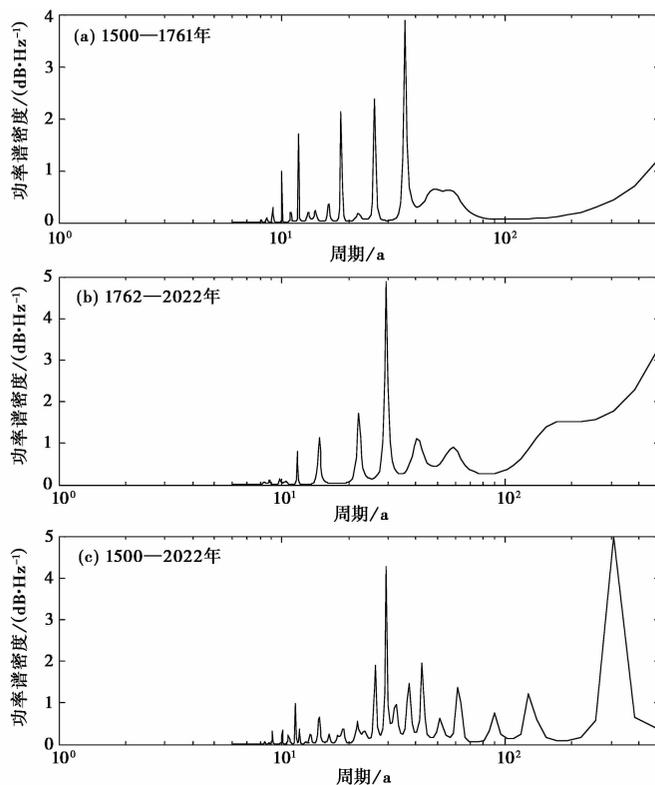


图3 不同时期的功率谱密度计算结果

个对应于周期 306.6a 的峰值。本文以 29.5a 为例,分析渤海及邻区地震活动的周期性特征。

根据上述周期分布情况,设计 1 个周期模型对地震序列进行非线性回归。周期模型的表达式为  $f(t) = A \sin(2\pi t/29.5 + B)$ ,其中  $t$  为时间, $A$  和  $B$  为待定系数,统计回归得到的预测模型表达式为  $f(t) = 0.3677 \sin(2\pi t/29.5 + 2.0288)$ 。图 4 显示了地震序列(黑色曲线)和预测模型(红色曲线),零线以上为峰区,预测模型得到的 17 个峰区中,有 11 个能够与地震序列的峰区相对应,占比约为 65%;相对而言,在 1762—2022 年间的对应性优于 1500—1761 年。

为进一步了解拟合周期模型对地震的预测能力,根据拟合周期模型计算地震发生时间处的预测值(图 4 中蓝色圆点)。由图 4 可以看出,大部分地震发生在零线之上,也就是说地震常发生在预测模型的峰区。统计结果表明,研究区内 85 次地震中共有 57 次主震事件,其中 40 次主震发生在预测模型的峰区,所占比例为 70%。考虑峰区约占整个时间段的 50%,表明预测模型有良好的预测效能,同时也从侧面验证了周期性的存在。

根据上述分析,认为渤海及邻区的地震序列具有一定的周期性特征,其优势周期可以用最大熵谱分析方法进行估算。

#### 4 渤海及邻区地震活动期的划分及应用

地震活动常呈现活跃期和平静期交替出现的特点。在地震强烈活动以后,一个地区或

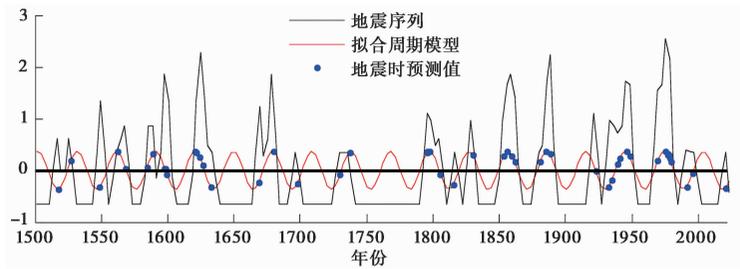
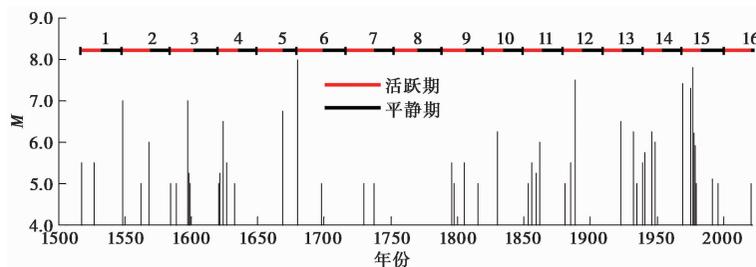


图4 渤海及邻区地震序列及拟合周期模型

一个地震带往往需要经过一段相对平静的时期才会再度活动。一般认为这是由于在活跃期中,地震释放了大量能量,故需要有足够的时间重新积累能量,当能量足以使岩石变形、破裂,地震活动方能再次活跃。一个活跃期和一个平静期,便组成一个地震活动期。

根据本文给出的渤海及邻区地震活动优势周期和周期模型拟合结果,对该区的地震活动期次进行划分。自1517年以来,研究区已经历16个活动期,每个活动期长度为29~36a,其中活跃期的长度为15~21a。经统计,在1517—2022年之间,活跃期长度合计277a,占比为55%,平静期长度合计229a,占比为45%。图5显示了 $M-t$ 图和地震活动期的划分情况,图中以红色线段所处时段为活跃期,黑色线段所处时段为平静期,从图中可以看出,多数地震发生在活跃期,少数发生在平静期。

图5 渤海及邻区 $M-t$ 图和地震活动期划分

按活跃期和平静期对16个地震活动期内的地震频次分别进行统计,统计结果见表1。根据表1的数据,1517年以来的57次5级以上地震中(不含余震),共有52次地震发生在活跃期,所占比例约为91%;5次地震发生在平静期,所占比例约为9%。平均而言,每个活动期发生的5级以上地震平均次数为2~4次,且基本发生在活跃期内。此外,各个活动期的地震活动水平差异较大,如第8个活动期内无5级以上地震记录,而第15个活动期的5级地震次数高达11次,第13个活动期的活跃期内仅发生1次5级以上地震,而平静期内发生2次5级以上地震,推测可能与清末至民国初期(1909—1923年)的历史地震记录缺失有关。

根据上述分析,推算第16个活动期结束时间在2028—2035年,目前研究区的地震活动处于平静期的中期,地震平静可能还将持续数年。按平均水平估计,研究区下一个活跃期持续时间为15~21a,5级以上地震为2~4次。

## 5 结论与讨论

本研究使用最大熵谱分析方法对渤海及邻区的历史地震资料进行统计分析,揭示该地

表 1 地震活动期分期统计

活动期	起止时间	活跃期			平静期		
		起止时间	$M \geq 5.0$ 地震次数	$M \geq 7.0$ 地震次数	起止时间	$M \geq 5.0$ 地震次数	$M \geq 7.0$ 地震次数
1	1517—1547年	1517—1531年	2	0	1532—1547年	0	0
2	1548—1583年	1548—1568年	3	1	1569—1583年	0	0
3	1584—1619年	1584—1601年	5	1	1602—1619年	0	0
4	1620—1648年	1620—1634年	7	0	1635—1648年	0	0
5	1649—1678年	1649—1668年	3	0	1669—1678年	0	0
6	1679—1715年	1679—1698年	2	1	1699—1715年	0	0
7	1716—1751年	1716—1736年	2	0	1737—1751年	0	0
8	1752—1787年	1752—1769年	0	0	1770—1787年	0	0
9	1788—1818年	1788—1805年	4	0	1806—1818年	1	0
10	1819—1848年	1819—1833年	1	0	1834—1848年	0	0
11	1849—1878年	1849—1863年	5	0	1864—1878年	0	0
12	1879—1908年	1879—1893年	3	1	1894—1908年	0	0
13	1909—1938年	1909—1923年	1	0	1924—1938年	2	0
14	1939—1967年	1939—1953年	4	0	1954—1967年	0	0
15	1968—1999年	1968—1983年	9	3	1984—1999年	2	0
16	2000—?年	2000—2020年	1	0	2021—?年	0	0

注：第 16 个地震活动期终止时间“?”表示时间未定。

区地震活动的周期性特征,并根据该周期性特征进行地震活动期次的划分,应用于对未来地震活动水平的预测。研究认为,渤海及邻区地震活动体现出一定的准周期性特征,显著周期在 29~36a 之间;自公元 1524 年以来,该地区共经历 16 个地震活动期,目前处于第 16 个活动期的平静期中期。

环渤海地区是中国重要经济带,同时也是历史地震活动频繁的区域,由于该地区长期未遭受过强烈地震的破坏影响,人们对未来地震活动水平和地震灾害风险缺乏基本认识,环渤海地区的民众普遍没有进行防震减灾准备意识。同时,考虑到渤海地区长期地震活动的平静,发生强震的可能性也随时间在不断增加,因此,很有必要进一步加强环渤海地区的防震减灾准备工作。政府部门应加强对当地居民的防震减灾宣传,提高人们对地震灾害的认识和应对能力,其中很重要的一点是需要向民众清楚地传递未来地震危险性的相关信息,使民众了解和认识到地震灾害的风险程度,形成自主进行防震减灾准备意识。同时,也需要采取有力措施,加强基础设施和工业设施的防震减灾准备工作,减轻地震对当地经济可持续发展性的影响。

地震活动的周期性通常表现为地震活跃期和平静期交替出现,其时间跨度可以从数十年到数百年。前人多从天体运行的周期性影响来解释地震活动的周期性,除外部因素之外,地震活动还受到多种内部因素的影响,如地球内部构造、地震能量的释放和累积等。因此,地震活动并不遵循严格的周期性。从本文研究结果看,渤海及邻区的地震活动整体上呈现

准周期特征,表现为大部分活跃期内均发生过破坏性地震,地震频次和强度明显高于平静期。借助于这种整体上的准周期性,可以进行地震期次的划分以及地震活动期内地震强度和频次的统计分析,据此可以对未来的有利发震时段和地震危险性进行预测或评估。

从 1500—1761 年研究区地震序列的功率谱密度看,其第一峰值对应的周期为 35.7a,接近 1500—2022 年的显著周期 29.5a。两个周期值存在差异性,可能反映了周期的波动范围。因此,在划分地震期次时,对活动期长度的取值范围设定在 29~36a 之间,用以涵盖地震活动周期的不确定性。

在估计下一个活跃期的地震活动水平时,本文采用平均数估计的原则。平均数估计是一种常见的统计方法,用于估计某个群体的特征或行为的平均水平,这种方法可以提供一种简单而直观的方式来理解和预测数据。在地震活动周期性研究中,平均数估计可以用于估计地震活动的平均水平,例如平均地震活动频率等。然而,需要注意的是,渤海及邻区活跃期的地震频次是一个变异性较大的参数,在使用平均数估计时,要考虑评估结果的变动范围。同理,在地震平静期一般很少发生 5 级以上地震,但并非不会发生 5 级以上地震。

根据历史地震记录,在第 7 个活动期内仅发生 2 次 5 级以上地震,第 8 个活动期内未发生 5 级以上地震,这可能与第 6 个活动期发生的 8 级地震的减震效应有关。同样,在第 15 个活动期发生了 3 次 7 级以上地震,最大震级为 7.8 级,之后在第 16 个活动期仅发生一次 5 级以上地震,地震活动明显偏弱,这可能也是受到大震减震效应的影响。

对大震减震效应和地震活动周期性进行研究,有助于更好地理解地震活动的规律,为防灾减灾工作提供科学依据。除此之外,对于地震活动周期性的物理机制,特别是天体运动对渤海及其邻区地震活动准周期性的影响,目前还没有明确的结论,这些问题可以作为下一步研究工作的重点。

## 参考文献

- 安鸿志,陈兆国,杜金观,等. 1983. 时间序列的分析与应用. 北京: 科学出版社, 247~264.
- 曹凤娟,唐喆,尹德录,等. 2012. 郯庐断裂(沈阳—渤海段)地震复发周期与危险性研究. 防灾减灾学报, 28(4): 1~6.
- 陈国光,徐杰,马宗晋,等. 2004. 渤海盆地现代构造应力场与强震活动. 地震学报, 26(4): 396~403.
- 刁守中. 2020. 华北地震活动韵律性及近期活动阶段分析. 地震科学进展, 50(2): 16~22.
- 刁守中,蒋海昆. 1990. 渤海及其邻区地震活动特征和构造涵义. 地震学刊, (3): 7~17.
- 高战武,缙亚森,钟慧,等. 2021. 中国东部海域断裂构造格架与地震活动研究. 震灾防御技术, 16(1): 11~18.
- 国家地震局震害防御司. 1995. 中国历史强震目录(公元前 23 世纪-公元 1911 年). 北京: 地震出版社, 1~514.
- 环文林,汪素云,常向东,等. 1989. 渤海地震活动特征. 地震研究, 12(1): 1~10.
- 黄玮琼,章准鲁,何淑韵,等. 1988. 东南沿海地区地震活动期的估计与趋势分析. 见: 丁原章,李珩,时振梁,等. 海南岛北部地震研究文集. 北京: 地震出版社, 185~193.
- 贾炯,刁桂琴,平建军,等. 2008. 首都圈地区地震时间序列的最大熵谱分析方法及地震危险性预测. 华北地震科学, 26(2): 7~11.
- 金安忠,吴子泉. 1990. 渤海地区地震的频发性与震源环境特征. 地震学刊, (3): 33~38.
- 李文英. 1996. 最大熵谱法在华北地震活动幕式结构分析中的应用. 地震, 16(2): 121~127.
- 吕悦军,彭艳菊,沙海军. 2003. 渤海及邻区地震活动环境. 地壳构造与地壳应力文集(15). 北京: 地震出版社, 38~44.
- 彭美焯. 1991. 山西地震带历史地震序列的极大熵谱分析. 地震, 11(6): 12~17.
- 王华林,王永光,刘希强,等. 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.
- 王健. 2007. 渤海海域历史地震和海啸. 地震学报, 29(5): 549~557.

- 汪素云,俞言祥,高阿甲,等. 2000. 中国分区地震动衰减关系的确定. 中国地震, **16**(2):99~106.
- 王铸,王宝银. 1988. 华北及山东地区地震序列数值分析. 中国地震, **4**(3):59~65.
- 谢卓娟,吕悦军. 2016. 渤海地震构造区空间分布函数的确定. 地球物理学进展, **31**(2):614~621.
- 薛艳,梅世蓉,宋治平. 2004. 天山地块强震活动的时空特征研究. 地震, **24**(2):7~16.
- 杨港生,赵根模,马淑芹. 2000. 渤海中部和胶辽海峡地震复发模式和地震危险性. 地震, **20**(4):69~73.
- 张郢珍,栗生平. 1985. 华北第三、四期地震活动及早涝因素的最大熵谱分析. 地震, **5**(5):34~37.
- 中国地震局震害防御司. 1999. 中国近代地震目录(公元1912年-1990年  $M_s \geq 4.7$ ). 北京: 中国科学技术出版社, 1~637.
- Burg J P. 1975. Maximum entropy spectral analysis. Ph. D. thesis, Stanford; Stanford University, 1~123.

## Periodic Characteristics of Earthquake Activity in the Bohai Sea and Surrounding Areas and Its Implications for Earthquake Prediction

Sha Haijun<sup>1,2)</sup>, Lü Yuejun<sup>1,2)</sup>, Peng Yanju<sup>1,2)</sup>, Xie Zhuojuan<sup>1,2)</sup>, Xiu Liwei<sup>1,2)</sup>

1) National Institute of Natural Hazards, MEMC, Beijing 100085, China

2) Key Laboratory of Compound and Chained Natural Hazards Dynamics (Under Construction), MEMC, Beijing 100085, China

**Abstract** Maximum entropy spectral analysis is applied to historic earthquake data from the Bohai Sea and its adjacent areas to statistically analyze and identify the periodic characteristics of seismic activity in the region. The results indicate that seismic activity in this area exhibits quasi-periodic behavior, with a dominant period ranging from 29a to 36a. Since 1517 AD, the region can be divided into 16 seismic periods, with the current period identified as a mid-term phase of seismic quiescence. The average seismicity level is estimated through statistical analysis of earthquake frequencies within each seismic period, providing valuable insights into the long-term patterns of seismic activity in the Bohai Sea region.

**Keywords:** The Bohai Sea; Earthquake activity; Periodicity; Maximum entropy spectral analysis; Earthquake prediction