

李欣蔚,张广伟,谢卓娟,等,2022. 渤海海域地震震源机制解与现今应力场特征. 中国地震,38(4):708~720.

渤海海域地震震源机制解与现今应力场特征

李欣蔚^{1,2)} 张广伟^{1,2)} 谢卓娟^{1,2)} 李世杰³⁾ 吕悦军^{1,2)}

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

3) 贵州省震灾风险防治中心,贵阳 550001

摘要 渤海地区是我国东部地震较为活跃的地区之一,历史上强震频发,曾被列为地震重点危险区,其震情备受关注。近期该地区有感地震多发,因此有必要深入了解这些地震的震源破裂性质,同时探究渤海地区现代构造应力场分布,以期为后续判识地震危险性研究工作提供科学参考。本文基于前人对渤海地区震源机制解的研究结果,采用波形反演方法计算并补充完善了 2010—2022 年 $M \geq 3.5$ 地震的震源机制解,使用 MSATSI 软件包反演计算区域构造应力场。结果表明,渤海海域近期地震事件以走滑型为主,其次为正断型,与地震事件附近主要断裂带的运动学特征具有较好的一致性;区域构造应力场的优势方位为 NEE 向,与华北地区构造应力场基本一致,整体相对稳定,局部存在一定差异,这与海域地震数量较少且分布不均有关,另外应力形因子 R 值相对较小,区域地壳应力以张应力为主。

关键词: 渤海 地震活动 郯庐断裂带 震源机制解 区域应力场

[文章编号] 1001-4683(2022)04-0708-13 [中图分类号] P315 [文献标识码] A

0 引言

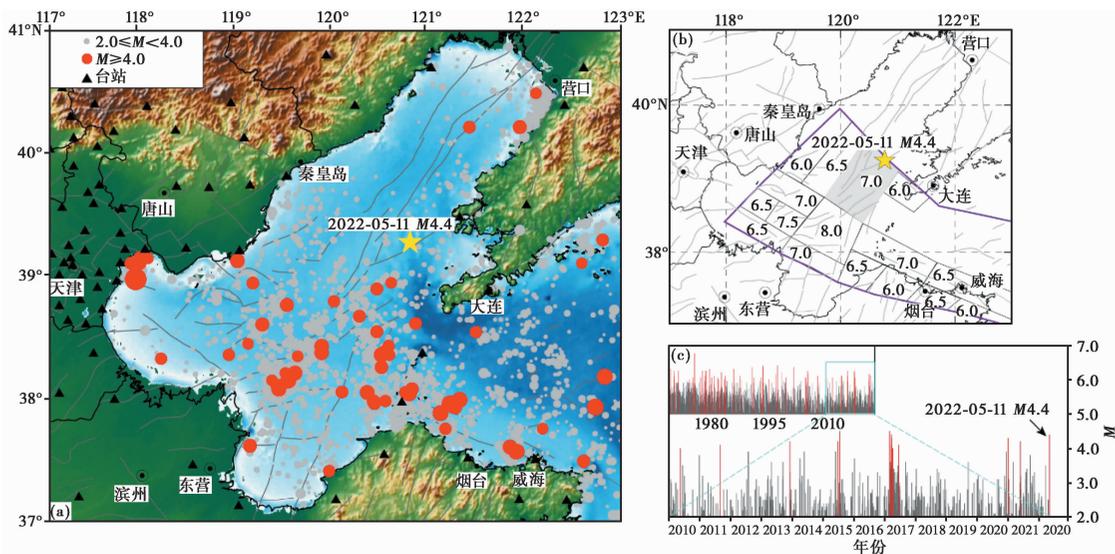
渤海连接华北和东北,沿海地区分布有众多城市,人口稠密、经济发达,同时渤海海洋资源丰富,其海域及滨海地区建设有大量海洋平台、跨海大桥、海底管线及隧道等重大建设工程,这些工程的安全问题尤为重要,必须考虑地震灾害的影响。渤海海域地处 NNE 向郯庐断裂带与 NWW 向张家口—渤海断裂带的共轭交汇部位,地质构造复杂,断裂极为发育(李西双,2008;高战武等,2017),是我国海域中地震活动最强烈的地区。渤海海域历史上共发生 6 级以上地震 12 次,7 级以上地震 4 次,其中最大一次是 1888 年 6 月 3 日发生的 7.5 级地震。王华林等(2000)研究表明,在 1969 年 7.4 级地震发生后,渤海地区已进入地震大释放后期,向平静期过渡,预测未来相当长一段时间内发生 6 级以上地震的可能性较小。但自 2010 年以来,渤海海域共发生 15 次 $M \geq 4.0$ 地震,最近一次为 2022 年 5 月 11 日发生的 4.4 级地震,为近 5 年来该区域发生的最大地震(图 1),这表明该区域的中小地震活动仍相对活跃。因此,有必要开展渤海海域近期地震震源破裂性质与现代构造应力场研究,探究地震活

[收稿日期] 2022-09-28 [修定日期] 2022-11-11

[作者简介] 李欣蔚,女,1998 年生,硕士研究生,主要从事地震活动性研究。E-mail:lixinwei_03@163.com

吕悦军,通讯作者,男,1966 年生,研究员,主要从事地震安全性评价、地震灾害风险评估研究。

E-mail:Luyj1@263.net



注:(a)渤海及周边地区地质构造背景与台站、震中分布;(b)渤海地震构造区潜在震源区划分,图中灰色区域为渤海东部潜在震源区,数字为所在潜在震源区的震级上限;(c)M-t图,图中断裂据邓起东等(2007),事件统计时间为1970年1月—2022年5月,红色线段表示 $M \geq 4.0$ 地震。

图1 渤海及周边地区地质构造简图及地震分布

动与断裂构造及现代构造应力场分布的关系,进而加深对渤海地区地震危险性的综合认识。

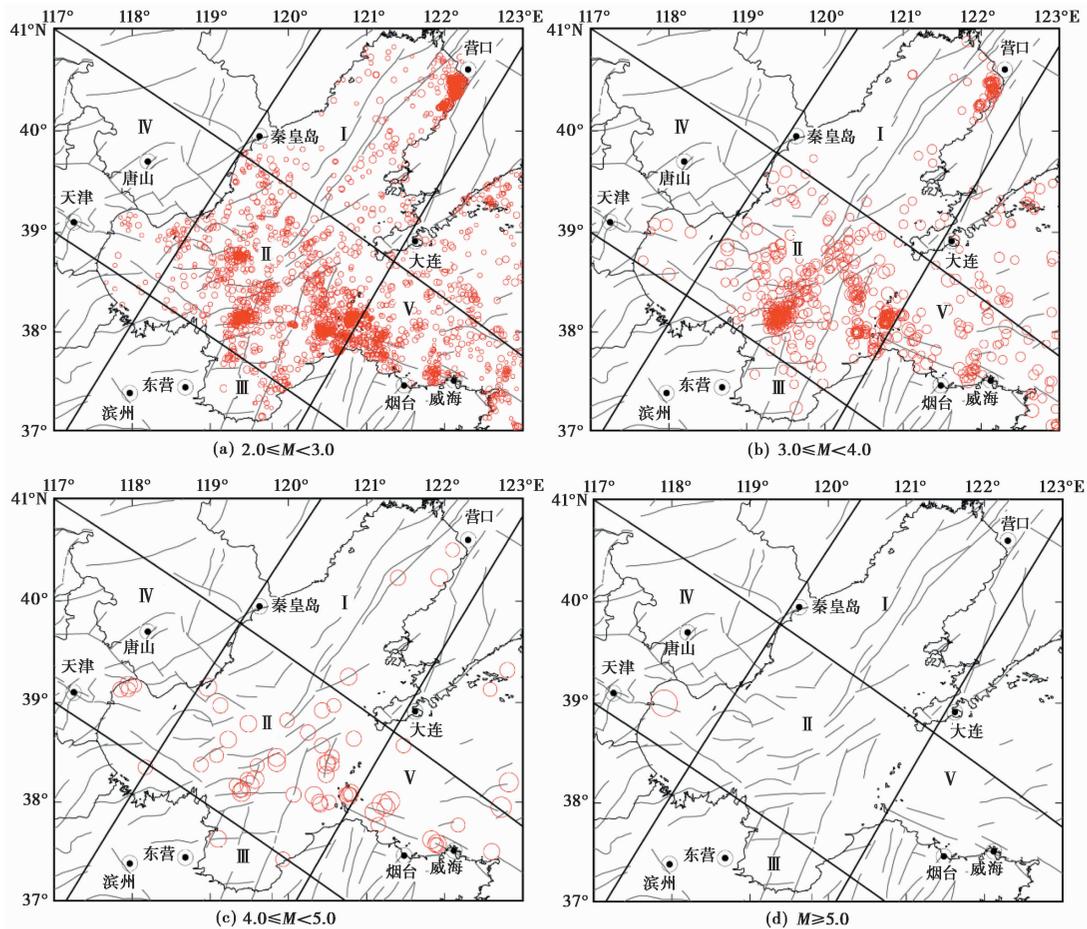
与大陆地区不同,海域地震监测台网密度有限、资料积累不足(林趾祥等,1999),地震资料完整性与震源参数准确性均有待提高。随着数字化地震观测技术的迅速发展,区域台网现已积累了大量观测资料,许多科研工作者基于这些资料在渤海及周围地区,采用P波初动极性、振幅比、波形反演等多种方法进行了震源机制解的相关研究,取得了丰富的研究成果(胡幸平等,2013;丰成君等,2017;林向东等,2017;朱艾澜等,2018;戴盈磊等,2021)。本文在这些研究成果的基础上,首先使用波形反演方法计算并补充完善2010—2022年渤海海域 $M \geq 3.5$ 地震的震源机制解资料,分析地震活动的震源特性与时空分布特征;其次,使用MSATSI软件包反演区域构造应力场,获得区域应力状态,深入分析地震发生与应力之间的关系,进而探讨地震事件的发震机理,为未来地震危险性评估提供参考。

1 渤海及周围地区地震活动特征

根据《中国近代地震目录(公元1912—1990年)》(中国地震局震害防御司,1999)和中国地震台网中心提供的数据资料,1970年1月—2022年5月期间渤海海域共发生2.0级以上地震3061个,以中小地震活动为主,其中,2.0~3.0级地震2892个,3.0~4.0级643个,4.0~5.0级64个,除1976年河北塘沽东附近发生的5.5级地震外,无5.0级以上地震。

分析这些数据可以发现,渤海及周围地区的地震活动在空间上具有明显的成带及分段特征,并且呈现出一定的周期性(孟建国等,2008;朱红彬等,2010)。郟庐断裂带(研究区内部分,下同)自北向南可划分为I、II、III三段;燕渤断裂带(研究区内部分,下同)自西向东可分为IV、II、V三段,各段的断裂空间展布与地震活动特性存在显著差异(图2)。其中,II段为2条断裂的复合交汇部位,以NE-NEE向断裂数量最多,地震活动的频次和强度明显大

于其他分段。同时,根据中国及邻区地震区带和潜在震源区划分结果,该段大部分属于渤海地震构造区,具有多个 6.0 级以上潜在震源区(图 1)。从渤海海域的地震分布情况可以看出,该区域的中强震主要位于渤海中部郟庐断裂带走向由 NNE 向 NE 转变的过渡地带,部分位于渤海海峡及烟台、威海北部 NW 向断裂附近,这些地区多发育晚更新世和第四纪活动断裂,对应的深部壳幔结构横向不均匀性较弱,显示有重力和航磁异常(刘光夏等,1996)。另外,渤海及周围地区的地震活动在时间上具有非均匀性,近些年以间隔一定时间内多次发生震级相差不大的地震为主要特点,呈现出强弱交替的趋势。



注:图中红色圆圈表示地震事件,圆圈大小正比于震级;断裂带分段修改自王华林等(2000)。

图2 渤海海域震中分布(1970年1月—2022年5月)

2 震源机制解

2.1 数据和方法

震源机制能够直观地给出地震破裂的几何特征和运动学特征,是研究区域构造应力场的主要手段。本研究使用国家数字测震台网数据备份中心提供的宽频带波形资料(郑秀芬等,2009),通过人工拾取的方法标记事件的各震相到时,同时参考 CRUST1.0 模型(Laske

et al, 2013) 设定震源区速度结构(表 1), 以完成震源机制解的计算。gCAP (generalized Cut and Paste) 方法 (Zhu et al, 2013) 是在 CAP 方法 (Zhu et al, 1996) 基础上发展得来的, 其将宽频带数字地震记录分为 Pnl 和面波两部分并赋予不同权重, 分别计算其理论波形与实际波形的拟合误差函数, 利用网格搜索法得到最小误差的最优解。为减少背景噪声对波形的干扰, 设置 Pnl 和面波滤波范围分别为 0.05~0.18Hz 和 0.05~0.1Hz; 走向、倾角和滑动角的搜索间隔均为 5°, 深度为 1km。采用频率-波数 (F-K) 法计算格林函数 (Zhu et al, 2002), 采样间隔为 0.1s, 采样点为 1024 个。

表 1 一维速度模型

层号	1	2	3	4	5
顶层深度/km	0	7	15	23	30
S 波速度/(km·s ⁻¹)	2.88	3.50	3.80	4.10	4.44
P 波速度/(km·s ⁻¹)	5.00	6.00	6.60	7.20	8.00

2.2 结果与分析

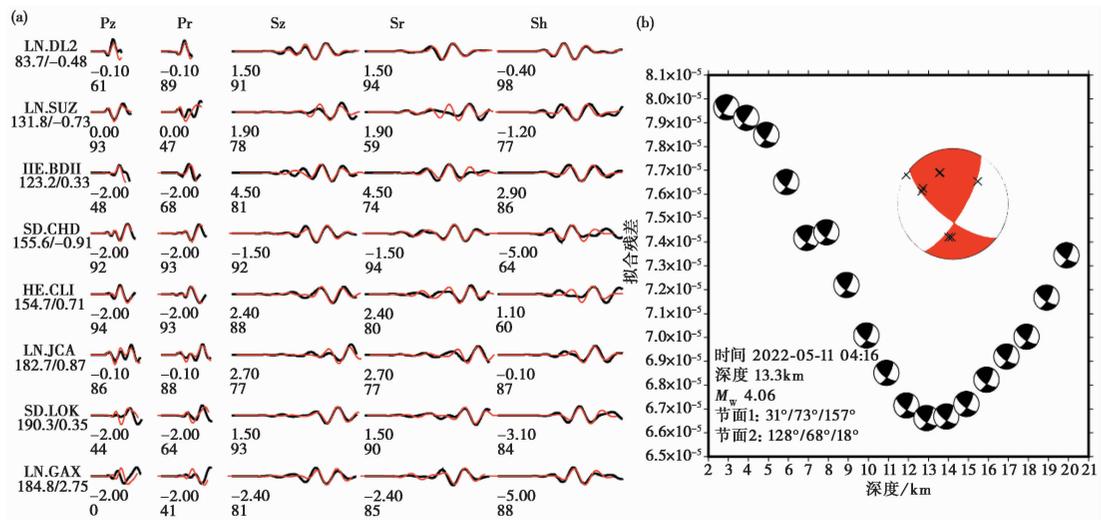
基于前人研究成果 (刘静等, 2016; 林向东等, 2017; 戴盈磊等, 2021), 结合本文计算补充的部分 $M \geq 3.5$ 地震震源机制解, 进一步完善了 2010—2022 年渤海海域的震源机制资料 (表 2)。这些震源机制解大多通过基于宽频带数字记录的地震波形反演方法得到, 避免了人为识别初动以及读取振幅的误差, 具有较高的可信度; 部分采用 P 波初动和振幅比方法, 误差相对较大, 但综合分析的结果能够为波形反演方法提供对比和约束 (王辉等, 2019)。其中, 渤海 M4.4 地震震源机制解反演共使用了 8 个台站, 总计 40 个波段的数据。反演结果显示, 本次地震节面 I 的走向、倾角和滑动角分别为 31°、73°和 157°, 节面 II 的走向、倾角和滑动角分别为 128°、68°和 18°, 矩震级为 4.06 (图 3)。从图中可以看出, 震源机制解在不同深度处展现的特征基本一致, 相对稳定, 表明深度对该结果的影响较小。

为验证反演参数的可靠性, 采用 Bootstrap 方法 (Efron, 1979) 进行重采样, 即从样本中随机抽样得到新的子样本, 并对反演参数进行统计分析, 以评价反演结果的稳定性及可靠性。通常, 采样次数约 100 次就可以对反演参数进行较为合理的评估 (Efron et al, 1986)。为了使结果更具统计意义, 这里设置采样次数为 200 次, 重抽样台站个数与每个地震事件实际反演台站个数相同, 部分台站会被重复采样, 对每次采样的台站进行波形反演, 最终获得走向、倾角及滑动角的统计结果, 并将其标记在直方图中 (图 4)。由图 4 可见, 使用重采样数据反演得到的震源参数相对集中, 证明了结果的稳定性。

通常, 利用波形反演方法得到的是反映断层破裂面中心位置的矩心深度, 而使用到时定位方法获取的是地震事件的初始破裂深度, 2 种深度间的差异与震级有关, 可达破裂尺度的一半 (罗艳等, 2013)。根据龙锋等 (2006) 提出的华北地区地震活断层的震级-破裂长度经验关系 $M_s = 3.82 + 1.86 \lg L$, 可估算出本次地震的震源破裂尺度约为 1km。而本研究通过 gCAP 方法得到的矩心震源深度约 13km, 中国地震台网中心与美国地质调查局提供的震源深度均为 10km, 上述 2 种深度间的差异与由经验关系式估算获得的结果相差较大, 因此认为矩心深度有待进一步推敲。不同的台站分布、速度模型精度有待提高等因素均可能使得计算震源深度的约束条件相对较弱, 进而导致深度结果有待推敲。此外, 震源区附近存在约 7km 厚

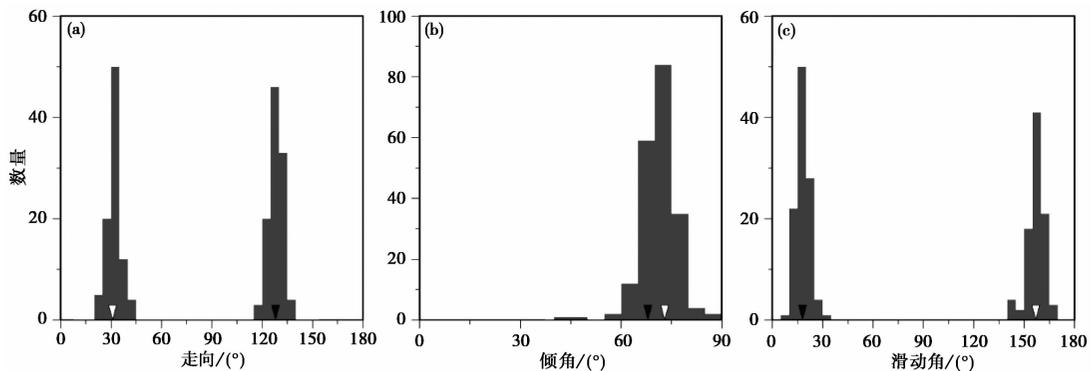
表2 渤海海域 $M \geq 3.5$ 地震的震源机制解(2010—2022年)

序号	发震时间		震中位置		M_L	深度 /km	节面 I / (°)			节面 II / (°)			P 轴 / (°)		T 轴 / (°)		来源
	年-月-日	时:分	东经/(°)	北纬/(°)			走向	倾角	滑动的角	走向	倾角	滑动的角	az	pl	az	pl	
1	2010-05-17	20:02	120.57	38.38	4.0	10.0	316	83	13	224	77	172	89	4	180	14	林向东等(2017)
2	2010-06-14	17:07	120.82	37.93	3.5	7.0	122	31	-16	225	81	-120	105	44	340	30	林向东等(2017)
3	2010-06-28	15:20	122.24	39.33	3.5	7.0	332	58	60	199	42	128	82	8	189	63	林向东等(2017)
4	2010-12-28	01:02	119.34	39.48	4.2	8.0	215	44	-160	110	76	-47	60	42	169	19	刘静等(2016)
5	2011-09-01	03:14	120.57	38.45	4.1	8.0	221	90	-148	131	58	0	90	22	351	22	林向东等(2017)
6	2012-07-31	14:40	121.07	38.03	3.9	7.0	245	59	-63	21	40	-127	203	64	316	10	本研究
7	2013-05-02	14:42	121.00	38.17	3.6	9.0	55	46	-69	206	47	-110	43	75	310	0	林向东等(2017)
8	2013-07-09	18:39	118.88	38.63	3.6	9.0	90	31	-70	246	61	-101	130	71	345	15	林向东等(2017)
9	2013-08-03	17:29	120.98	39.82	3.5	7.0	83	22	-25	196	81	-110	84	50	303	32	林向东等(2017)
10	2013-11-27	05:15	120.87	40.55	3.5	5.0	89	80	-39	187	51	-167	40	34	143	18	林向东等(2017)
11	2013-12-06	17:45	120.07	38.08	4.2	13.0	103	62	30	357	63	148	50	1	319	40	林向东等(2017)
12	2014-04-05	01:37	121.15	37.93	3.7	8.0	129	48	-48	255	56	-126	108	59	10	4	林向东等(2017)
13	2014-05-26	04:03	120.80	38.38	3.9	5.0	120	55	-44	238	55	-135	89	53	359	0	林向东等(2017)
14	2015-06-01	04:41	122.31	38.05	3.9	20.0	54	60	17	315	75	148	7	10	270	32	本研究
15	2015-06-29	07:03	120.84	38.64	4.2	18.0	274	72	-25	12	66	-160	231	30	324	3	本研究
16	2015-06-29	07:16	120.81	38.63	3.7	17.0	97	75	-22	192	68	-163	53	26	145	4	本研究
17	2015-07-22	08:51	120.32	38.03	4.0	5.4	301	84	-10	32	80	-173	256	11	346	2	本研究
18	2016-01-12	00:41	119.50	38.19	3.7	19.0	321	35	48	188	64	115	260	16	137	61	本研究
19	2017-03-24	03:26	119.49	38.79	4.4	22.0	51	37	-109	254	55	-76	205	75	334	9	马婷等(2021)
20	2017-03-27	23:34	119.40	38.76	3.5	15.0	41	90	-18	131	72	180	354	12	87	12	马婷等(2021)
21	2021-05-31	07:23	120.41	38.01	3.7	9.0	315	79	-24	49	66	-167	270	24	4	8	本研究
22	2022-05-11	04:33	120.78	39.30	4.4	10.0	31	73	157	128	68	18	80	3	348	28	本研究



注：(a) 理论（红色）和实际（黑色）波形对比；(b) 震源深度拟合；波形下方数字表示理论相对于实际波形的移动时间和二者的相关系数，波形左侧大写字母表示台站名，台站名下方数字表示震中距和相对偏移时间。

图3 2022年5月11日渤海M4.4地震震源机制解计算结果



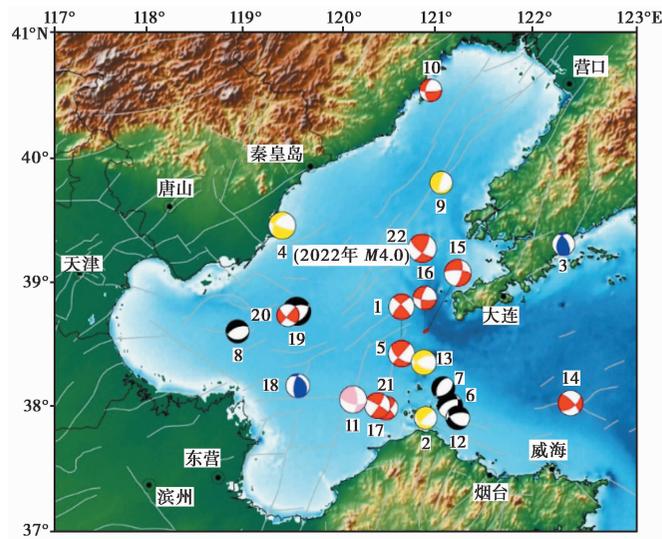
注：三角形表示实际反演所得参数值，其中白色三角形为节面 I，黑色三角形为节面 II。

图4 使用 Bootstrap 法重抽样得到的渤海 M4.4 地震震源参数分布直方图

的松散沉积覆盖层；同时，渤海中部凹陷及渤海南部隆起附近的地壳下部存在部分小规模高速异常体 (Hao et al, 2013)，这些结构会改造震相形态并影响震相走时，使得事件的震源深度不易确定 (谢祖军等, 2012；董一兵等, 2018；朱冰清等, 2019)，因此还需收集更多的波形资料，进行更为细致的分析，在此不作深入讨论。

本文使用万永革 (2019、2022) 以震源机制水平应变花理论中的面应力为指标提出的方法，进一步划分震源机制类型。该方法物理意义明确，有效避免了各轴倾伏角组合的复杂规定，并且消除了不确定型这一类别，能够更为直观地显示震源机制的类型及特征。分类结果显示，走滑型事件有 10 个，占总数的 45.45%；正断型有 5 个，占总数的 22.73%；正走滑型有 4 个，占总数的 18.18%，表明渤海海域的震源机制类型以走滑型为主。事件相对集中地分布在张渤断裂带的蓬莱—烟台段附近，少数位于陆地边缘 (图 5)。其中，沿郯庐断裂带分布的地震事件具有明显的走滑特征，断裂带东侧地震相对活跃，事件以走滑型为主；西侧地

震数量较少,类型方面未表现出显著统一特征,这与断裂带东西两侧的地球物理特征及分支断裂的活动强度差异等因素有关。此外,沿张家口—蓬莱断裂带分布的事件大多分布在渤海海峡附近,以正断型为主,部分兼有走滑特征,少数走滑型、逆断型地震可能是因该地区断裂密集、受多个断裂系影响所致。



注:黑色为正断型,蓝色为逆断型,红色为走滑型,黄色为正走滑型,粉色为逆走滑型。

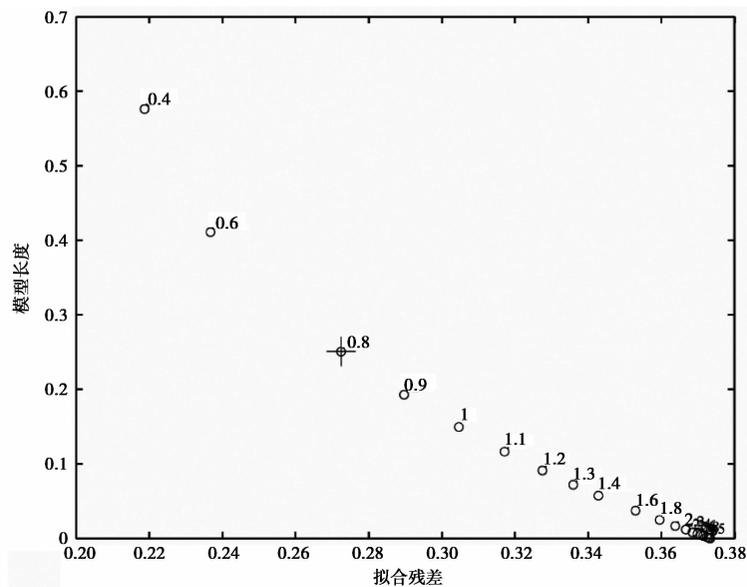
图5 渤海海域 $M \geq 3.5$ 地震震源机制解空间分布

3 区域构造应力场

应力场反演能够为研究地震的孕育过程、发震趋势以及区域构造动力环境等提供参考,同时能有效揭示地壳现代构造活动性质(梁姗姗等,2020;胡晓辉等,2020)。本研究使用 MSATSI(Martínez-Garzón et al,2014)软件包反演研究区应力场,该方法根据 SATSI(Spatial And Temporal Stress Inversion)算法(Hardebeck et al,2006)重新设计,采用各种图表示 $0 \sim 3D$ 的法向应力反演结果,使其可视化。MSATSI 方法通过加入一个合理的阻尼使反演的相邻区域应力张量变化最小,进而消除因人为划分反演区域而造成的应力偏转假象,以更好地呈现应力场整体特征。本文所研究的地震震级相对较小,空间分布均匀性较差,为了更好地反映局部区域应力状态,选取了地震相对集中的区域($37^{\circ}N \sim 40^{\circ}N, 119^{\circ}E \sim 122^{\circ}E$),并将其划分为 9 个 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 的网格,设定每个网格内参与反演的最小事件数为 1,地震个数较少的网格点内,程序会利用邻近网格及其周围一定范围内的多个震源机制解进行应力张量平滑约束。此外,本研究在 95% 的置信度下,对所有数据进行 1000 次的重采样,以确定应力场参数的不确定度,并根据反映数据拟合残差与模型长度关系的折中曲线,选取最佳阻尼系数为 0.8 (图6)。

经计算可获得最优状态下3个主应力轴方向及应力形因子 R (Gephart et al,1984)

$$R = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\sigma_3 - \sigma_1} \quad (1)$$



注：空心圆旁标注数字为阻尼参数的取值，“十”字为选取的最佳阻尼系数。

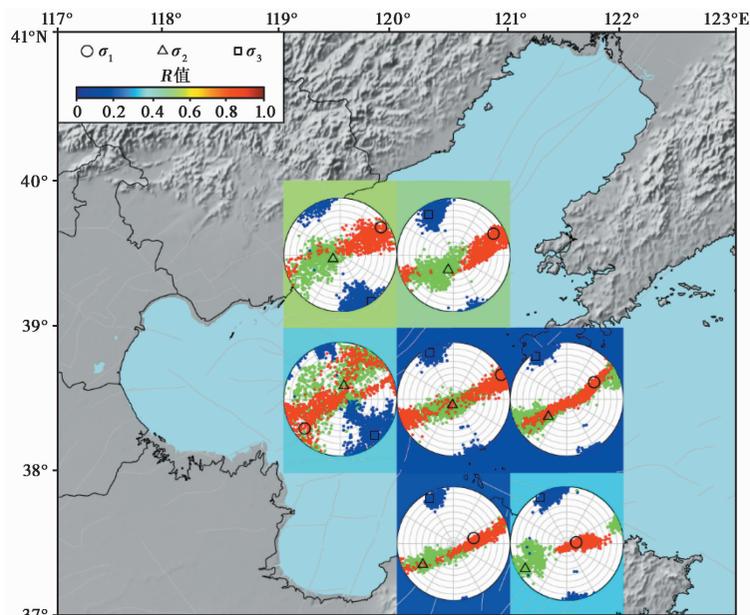
图6 模型长度和数据拟合残差的折中曲线

其中, σ_1 、 σ_2 、 σ_3 分别为最大、中间和最小主压应力; R 为应力形因子, 反映了相对应力大小, 当 R 值接近于 1 时, 最小主压应力 (σ_3) 与中间主应力 (σ_2) 表现的张应力状态一致, 即中间主应力也呈现出一定的拉张成分, 处于双轴拉张的应力状态, 两轴无法区分; 当 R 值接近 0.5 时, 最大主压应力轴和最小主压应力轴均确定; 当 R 值接近于 0 时, 表示主压应力 (σ_1) 与中间主应力 (σ_2) 表现出一一致的压应力状态, 处于双轴压缩状态, 两轴无法区分 (万永革等, 2011)。

基于渤海海域中小地震震源机制资料, 使用上述反演方法和设定参数进行应力场反演, 得到的反演结果如图 7 所示。由图可见各网格内的最大主压应力 σ_1 优势方位大多呈 NEE 向, 区域构造应力场整体相对稳定。丰成君等 (2017) 基于《中国大陆地壳应力环境数据库》研究成果, 参考水压致裂地应力测量等多种应力数据后分析认为, 郯庐断裂带渤海段及邻区现今构造应力场主压应力优势方位为 NE—NEE—近 EW 向, 与华北地区构造应力场最大主应力主导方向 (NEE) 基本一致, 有利于 NNE 向断裂带产生右旋走滑活动。本文反演结果与上述结论相近, 可靠性得以验证。另外, 部分分区之间、分区与整体区域间的应力状态存在一定的差异, 如郯庐断裂带与张渤断裂带交汇处附近的应力轴无明显优势分布, 而渤海海峡附近的应力轴则相对稳定, 表明渤海海域的应力分布具有非均匀性, 这可能与事件附近断裂带结构的复杂程度、事件数量及其分布状况有关。在后续工作中, 可以进一步收集渤海及邻区以井壁崩落和应力解除法取得的钻井区应力场资料 (陈国光等, 2004), 以改善渤海海域震源机制解资料不足的缺陷。

应力形因子 R 的空间分布反映了区域地壳应力场主应力相对大小的分布情况。图 7 显示, 渤海海域整体的 R 值较低, 在渤海湾东部, R 值处于 0.1~0.4 范围内, 拉张效应比较明显。另外, 在渤海海域 $M \geq 3.5$ 地震中, 大多数事件的 P 轴倾伏角相对较大, 较为直立; T 轴

倾伏角相对较小,较为水平(表2),拉张作用比较明显。前人研究显示,郯庐断裂带渤海段在新生代具有明显的右旋走滑特征,并且叠加有强烈的拉张裂隙作用(邓起东等,2001),特别是渤海中部拗陷内沿断裂带分布的次级断裂,具有明显的水平拉张和垂向差异活动(漆家福等,2008),这表明断裂带附近的地应力状态与其所表现出的运动学特征具有较好的一致性。



注:红点,绿点和蓝点分别表示在95%的置信度水平下 σ_1 , σ_2 , σ_3 的不确定范围;网格颜色表示应力形因子分布。

图7 应力场反演结果

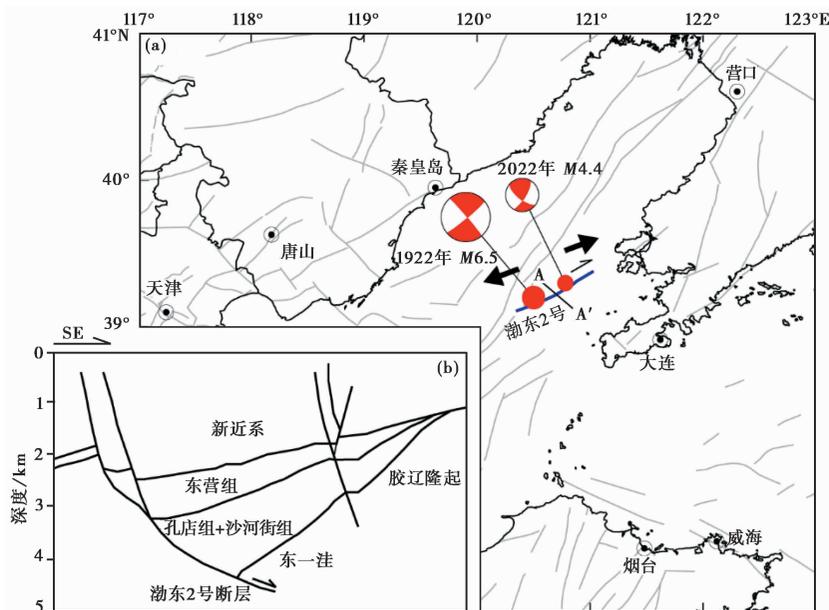
4 讨论

渤海地区位于太平洋板块向欧亚板块运动碰撞挤压的交界处,主要受两板块相对运动所产生的俯冲挤压作用控制,同时受菲律宾板块向欧亚板块俯冲产生的侧向挤压作用影响,板块运动产生的区域NEE向挤压应力构成了渤海及周围地区断裂活动和地震孕育的基本动力(徐纪人等,2008;徐杰等,1999,2012;丰成君等,2017)。渤海上地幔隆起及其产生的构造应力,在决定着应力集中、介质破裂和地震发生的位置的同时,也成为了加速介质破裂和地震发生的触动力(王华林等,2000),这两种构造应力共同控制着渤海及周围地区的强震活动。

渤海盆地及邻区的地壳厚度为27~32km(卢造勋等,1999),比周围的华北平原、辽东湾地区的地壳薄2~6km。谢卓娟等(2008)统计分析了渤海海域小震的平均震源深度,认为该区域事件主要分布在10~20km范围内,属于发生在中、上地壳内的浅源地震,略深于华北地震带内地震的震源深度。海域地震的震源深度在空间上分布不均匀,这与海域深大断裂及盖层或壳内断裂的活动强度及复杂程度有关,也是事件发震机理具有差异性的原因。

2022年渤海M4.4地震震中位于渤海东部2号断裂附近,该断裂走向NE,倾向SE,长约

90km,表现出右旋正断性质^①,西段有微弱活动,垂向活动性弱,为相对简单的单一半地堑结构,剖面上表现为上陡下缓的产状或与上盘刺激断层组合为“Y”字型(图8)(吴智平等,2013;李春荣,2015)。渤海东部2号断裂与郯庐断裂带渤海段斜交以北为辽东湾,辽东湾内地震活动较弱,小震较少,几乎没有中强震,地震和各次级断裂没有明显的对应关系,各次级断裂活动时间为晚更新世中-晚期(李西双等,2010)。本次地震的震中距200km范围内设有13个台站,主要集中在辽宁和山东地区,少量分布在河北及北京地区(图1),波形数据信噪比较低,未能通过震相拾取及关联等手段有效检测遗漏地震事件,无法进一步明确地震序列与已知断层的对应关系,仅能结合震源机制解节面走向判断发震构造的几何特征。据记载,渤海东部2号断裂在1922年曾发生6.5级地震,断层面的走向、倾角和滑动角分别为50°、85°和-177°(沈正康等,2004),上述震源参数所描述的事件特征与本次地震相近,同时考虑2次地震事件震中位置相邻,推测渤海M4.4地震发震构造与渤海东部2号断裂有关。



注:图中黑色粗箭头表示震源区附近 σ_1 优势方位,地震剖面AA'改自李春荣等(2015)。

图8 2022年渤海M4.4地震发震构造及地震剖面AA'

5 结论

本文以渤海海域内中强地震为研究对象,计算并完善了2010—2022年该区域内 $M \geq 3.5$ 地震的震源机制资料,在此基础上反演区域现代构造应力场,得到以下认识:

(1)渤海海域的地震多发生在断裂交汇处,具有分段及分区特征,近些年中强地震主要位于郯庐断裂带东侧及渤海海峡附近,震级均未超过5级。

(2)根据补充完善后的震源机制资料,发现事件类型以走滑型为主,其次为正断型。通

^① 渤中34-1油田北块ODP工程场地地震危险性分析报告。

过gCAP波形反演方法,得到2022年渤海M4.4地震的震源机制解如下:节面I的走向、倾角和滑动角分别为 31° 、 73° 和 157° ,节面II的走向、倾角和滑动角分别为 128° 、 68° 和 18° ,矩震级为4.06,显示该地震为走滑型。

(3)区域构造应力场反演结果显示,渤海海域构造应力场的优势方位为NEE向,与华北地区构造应力场基本一致,整体相对稳定,部分分区主压力轴的优势方位间存在差异,这可能与海域地震数量较少且分布不均有关,同时应力形因子 R 值相对较小,区域地壳应力以张应力为主。

(4)板块运动产生的区域NEE相挤压应力与上地幔隆起及其产生的构造应力共同控制着渤海及周围地区的强震活动,同时海域深大断裂及盖层或壳内断裂的活动强度及复杂程度也影响着地震的发生。

参考文献

- 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.
- 戴盈磊,张文静,王承伟,等,2021.基于MSATSI的辽宁地区构造应力场特征.防灾减灾学报,37(3):1~8.
- 邓起东,闵伟,晁洪太,等,2001.渤海地区新生代构造与地震活动.见:卢演俦.新构造与环境.北京:地震出版社.
- 邓起东,冉勇康,杨晓平,等,2007.中国活动构造图(1:400万).北京:地震出版社.
- 董一兵,倪四道,李志伟,等,2018.基于近震转换波的沉积层地区震源深度测定方法.地球物理学报,61(1):199~215.
- 丰成君,张鹏,戚帮申,等,2017.郯庐断裂带附近地壳浅层现今构造应力场.现代地质,31(1):46~70.
- 高战武,徐杰,赵铁虎,等,2017.营口-潍坊断裂带新构造和新构造活动的再认识.地震地质,39(1):43~53.
- 胡晓辉,盛书中,万永革,等,2020.2019年6月17日四川长宁地震序列震源机制与震源区震后构造应力场研究.地球物理学进展,35(5):1675~1681.
- 胡幸平,崔效锋,2013.华北地区中部地震精定位与构造应力场研究.震灾防御技术,8(4):351~360.
- 李春荣,2015.渤海海域渤东凹陷结构特征与勘探方向.海洋石油,35(4):1~7,34.
- 李西双,2008.渤海活动构造特征及其与地震活动的关系研究.博士学位论文.青岛:中国海洋大学.
- 李西双,赵月霞,刘保华,等,2010.郯庐断裂带渤海段晚更新世以来的浅层构造变形和活性性.科学通报,55(8):684~692.
- 梁姗姗,徐志国,盛书中,等,2020.2019年四川长宁6.0级地震主震及中强余震($M_s \geq 4.0$)的震源机制及其应力场.地震地质,42(3):547~561.
- 林向东,袁怀玉,徐平,等,2017.华北地区地震震源机制分区特征.地球物理学报,60(12):4589~4622.
- 林趾祥,晁洪太,1999.加强海域地震研究及其意义.见:中国地震学会成立20周年纪念文集.北京:地震出版社,94~98.
- 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.
- 刘静,董建辉,陈婷,等,2016.河北及邻区震源机制与构造应力场.华北地震科学,34(3):42~47.
- 龙锋,闻学泽,徐锡伟,2006.华北地区地震活断层的震级-破裂长度、破裂面积的经验关系.地震地质,28(4):511~535.
- 卢造勋,蒋秀琴,白云,等,1999.胶辽渤海地区地壳上地幔结构特征与介质的横向非均匀性.华北地震科学,17(2):43~51.
- 罗艳,曾祥方,倪四道,2013.震源深度测定方法研究进展.地球物理学进展,28(5):2309~2321.
- 马婷,邓莉,王晓山,等,2021.2017年3月渤海地震序列微震检测与发震构造分析.中国地震,37(2):415~429.
- 孟建国,李峰,陈琳,等,2008.渤海海域近期地震活动分析.高原地震,20(4):32~36,20.
- 漆家福,邓荣敬,周心怀,等,2008.渤海海域新生代盆地中的郯庐断裂带构造.中国科学:(D辑),38(S1):19~29.
- 沈正康,万永革,甘卫军,等,2004.华北地区700年来地壳应力场演化与地震的关系研究.中国地震,20(3):211~228.
- 万永革,[2022-11-07].震源机制水平应变花面应变的地震震源机制分类方法及序列震源机制总体特征分析.地球科学:1~16. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1874.p.20220715.1532.014.html>.
- 万永革,2019.同一地震多个震源机制中心解的确定.地球物理学报,62(12):4718~4728.

- 万永革, 盛书中, 许雅儒, 等, 2011. 不同应力状态和摩擦系数对综合 P 波辐射花样影响的模拟研究. 地球物理学报, **54**(4):994~1001.
- 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.
- 王辉, 曹建玲, 徐化超, 2019. 中小地震震源机制解在青藏高原东南缘地区断层稳定性分析中的初步应用. 地震地质, **41**(3):633~648.
- 吴智平, 薛雁, 颜世永, 等, 2013. 渤海海域渤东地区断裂体系与盆地结构. 高校地质学报, **19**(3):463~471.
- 谢卓娟, 吕悦军, 彭艳菊, 等, 2008. 渤海海域地震震源深度的分布特征. 震灾防御技术, **3**(3):311~320.
- 谢祖军, 郑勇, 倪四道, 等, 2012. 2011 年 1 月 19 日安庆 $M_L 4.8$ 地震的震源机制解和深度研究. 地球物理学报, **55**(5):1624~1634.
- 徐纪人, 赵志新, 石川有三, 2008. 中国大陆地壳应力场与构造运动区域特征研究. 地球物理学报, **51**(3):770~781.
- 徐杰, 宋长青, 高战武, 1999. 营口-潍坊断裂带新生代活动的特征. 地震地质, **21**(4):289~300.
- 徐杰, 周本刚, 计凤桔, 等, 2012. 中国东部海域及其邻区现代构造应力场研究. 地学前缘, **19**(4):1~7.
- 郑秀芬, 欧阳彪, 张东宁, 等, 2009. “国家数字测震台网数据备份中心”技术系统建设及其对汶川大地震研究的数据支撑. 地球物理学报, **52**(5):1412~1417.
- 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). 北京:中国科学技术出版社.
- 朱艾澜, 徐锡伟, 王鹏, 等, 2018. 以精定位背景地震活动与震源机制解研究郟庐断裂带中南段现今活动习性. 地学前缘, **25**(1):218~226.
- 朱冰清, 曹井泉, 赵黎明, 等, 2019. 地震震源深度测定方法研究综述. 内陆地震, **33**(4):321~329.
- 朱红彬, 邢成起, 李红, 等, 2010. 华北构造区主要地震带分段与强震活动. 地震学报, **32**(6):705~717.
- Efron B, 1979. Bootstrap methods; another look at the jackknife. *Ann Statist*, **7**(1):1~26.
- Efron B, Tibshirani R, 1986. Bootstrap methods for standard errors, confidence intervals, and other measures of statistical accuracy. *Statist Sci*, **1**(1):54~75.
- Gephart J W, Forsyth D W, 1984. An improved method for determining the regional stress tensor using earthquake focal mechanism data: Application to the San Fernando Earthquake Sequence. *J Geophys Res*, **89**(B11):9305~9320.
- Hao T Y, You Q Y, Liu L H, et al, 2013. Joint land-sea seismic survey and research on the deep structures of the Bohai Sea areas. *Acta Oceanol Sin*, **32**(12):13~24.
- Hardebeck J L, Michael A J, 2006. Damped regional-scale stress inversions: Methodology and examples for southern California and the Coalinga aftershock sequence. *J Geophys Res*, **111**(B11):B11310.
- Laske G, Masters G, Ma Z T, et al, 2013. Update on CRUST1.0: A 1-degree global model of earth's crust. In: EGU General Assembly 2013. Vienna: AGU.
- Martínez-Garzón P, Kwiatek G, Ickrath M, et al, 2014. MSATSI: A MATLAB package for stress inversion combining solid classic methodology, a new simplified user-handling, and a visualization tool. *Seismol Res Lett*, **85**(4):896~904.
- Zhu L P, Ben-Zion Y, 2013. Parametrization of general seismic potency and moment tensors for source inversion of seismic waveform data. *Geophys J Int*, **194**(2):839~843.
- Zhu L P, Helmberger D V, 1996. Advancement in source estimation techniques using broadband regional seismograms. *Bull Seismol Soc Am*, **86**(5):1634~1641.
- Zhu L P, Rivera L A, 2002. A note on the dynamic and static displacements from a point source in multilayered media. *Geophys J Int*, **148**(3):619~627.

Characteristics of the Focal Mechanism Solution and the Present Stress Field in the Bohai Sea Region

Li Xinwei^{1,2)}, Zhang Guangwei^{1,2)}, Xie Zhuojuan^{1,2)}, Li Shijie³⁾, Lü Yuejun^{1,2)}

1) National Institute of Natural Hazards, Ministry of Emergency Management of China, Beijing 100085, China

2) Key Laboratory of Compound and Chained Natural Hazards Dynamics, Ministry of Emergency Management of China, Beijing 100085, China

3) Guizhou Earthquake Disaster Risk Prevention and Governance Center, Guiyang 550001, China

Abstract The Bohai area is one of the relatively active regions in eastern China, with frequent strong earthquakes in history, which has been classified as a key earthquake-prone region, and its seismicity draws much attention. Recently, there have been many felt earthquakes. Therefore, it is critical to understand the focal rupture features of those earthquakes and investigate the distribution of the modern tectonic stress field to provide scientific reference for estimating the future earthquake risk. In this paper, we use the waveform inversion method to calculate the focal mechanism solution of the $M \geq 3.5$ earthquakes from 2010 to 2022 to supplement related data based on the results of previous research and invert the regional tectonic stress field with the MSATSI software package. The results suggest that the recent events are mainly the strike-slip mode, followed by the normal faulting, which is consistent with the kinematic features of the main fault zone nearby. The dominant orientation of the regional tectonic stress field is NEE, which is consistent with the regional tectonic stress field in North China. The overall stress field is relatively stable, and there are some local differences in the locality, which is related to the small number of earthquakes and the uneven distribution in the sea area. Furthermore, the shape factor R-value is relatively low, indicating the regional crustal stress is dominated by tensile stress.

Keywords: The Bohai Sea; Seismicity; The Tanlu Fault zone; Focal mechanism solution; Regional stress field