

DOI: 10.16108/j.issn1006-7493.2018016

江苏—南黄海地区地震活动时空分布特征及其孕震构造分析

李旭东^{1,2}, 刘绍文^{1,2*}, 王丽³

1. 海岸与海岛开发教育部重点实验室, 南京大学地理与海洋科学学院, 南京 210023;
2. 中国南海研究协同创新中心, 南京 210023; 3. 江苏省水文水资源勘测局, 南京 210029

摘要: 江苏—南黄海地区城市密集, 人口众多, 是中国东部经济最发达的地带之一。同时, 该地区历史上曾频发中—强以上级别的地震, 地震及次生地质灾害是威胁该区经济社会发展的自然灾害之一。该区的地震活动时空特征和发震机制还不清楚。本文通过整理江苏—南黄海地区的历史和仪器记录地震数据, 分析了该区地震活动时空分布格局, 发现地震活动主要集中于若干条区域活动断裂带, 在时间上具有约60年的平静期, 目前仍处于地震活跃期。深部构造研究还表明该区域内地震活跃的南部拗陷和勿南沙隆起区均存在显著的地球物理异常, 表明地震活动与区域深部构造有关。东部菲律宾海板块的俯冲作用和印度—欧亚大陆碰撞引起的板块边界挤压力和大陆边缘因地形高程差异伴随的重力势能是中国海洋地震的主要驱动力。上述认识不仅加深了对江苏—南黄海地区地震构造环境的理解, 同时也能对该区防震减灾公益事业提供科学参考。

关键词: 地震地质; 活动断层; 现代构造应力场; 深部构造; 南黄海

中图分类号: P315.5

文献标识码: A

文章编号: 1006-7493 (2018) 04-0551-12

Spatiotemporal Pattern of Earthquake Activities and Seismotectonics in Jiangsu and Adjacent Southern Yellow Sea Area

LI Xudong^{1,2}, LIU Shaowen^{1,2*}, WANG Li³

1. Ministry of Education Key Laboratory of Coast and Island Development, School of Geographic and Oceanographic Sciences, Nanjing University, Nanjing 210023, China;
2. Collaborative Innovation Center for South China Sea Studies, Nanjing 210023, China;
3. Hydrology and Water Resources Survey Bureau of Jiangsu Province, Nanjing 210029, China

Abstract: Jiangsu Province and the adjacent Southern Yellow Sea area is one of the most economically developed regions in east China, along with dense cities, large population and integrative infrastructures. This area is, unfortunately, vulnerable to earthquake hazard threatening its socio-economic development. Historically a number of medium and strong magnitude earthquakes frequently occur this area. The seismogenic mechanism for this area is not well understood. Here we collect all the historical and instrumental earthquake data available in this area, to investigate the spatiotemporal pattern of the seismicity and its seismotectonics. We found that the earthquakes are clustered and generally associated with several main active fault zones; the seismically quiescent period for this area approximates to 60 years, and it is now still at the active phase. In addition, integrative geophysical analysis demonstrates that the Wunansha Uplift and Southern Depression of the Jiangsu and Southern Yellow Sea areas, where the seismicity is comparatively intensive, show prominent deep structure anomalies, suggesting a genetic link between the seismicity and deep structure. The westward subduction of the Philippian Sea Plate and the far field effect of the Indo-Asia continental collision, along with the gravity potential difference derived from the elevation contrast between the craton and shelf area, account for the driving force triggering the earthquake.

收稿日期: 2018-02-03; 修回日期: 2018-03-08

基金项目: 中国国家自然科学基金项目(41176037); 南京大学大学生创新训练项目(XZ1310284007); 国家科技重大专项课题子任务(2016ZX05026-002-007)联合资助

作者简介: 李旭东, 男, 1993年生, 硕士研究生, 海洋地质学专业; E-mail: mg1527080@smail.nju.edu.cn

*通讯作者: 刘绍文, 男, 1977年生, 副教授, 从事海洋地质与地球物理方面的研究; E-mail: shaowliu@nju.edu.cn

The results presented here not only promote our understanding of seismotectonics in this region but also have important significance for earthquake hazard mitigation in the Jiangsu and Southern Yellow Sea area.

Key words: seismotectonics; active fault; tectonic stress field; deep structure; Southern Yellow Sea

Corresponding author: LIU Shaowen, Associate Professor; E-mail: shaowliu@nju.edu.cn

1 引言

减轻自然灾害是全人类共同的需求。中国近海及邻区位于太平洋板块与欧亚板块之间的洋—陆过渡带上,地理位置特殊,构造环境复杂,也是多地震灾害区(刘光鼎,1992;杨港生等,2000;彭艳菊等,2008;刘绍文,2013)。江苏沿海和长江三角洲地区,城市密集,人口众多,基础设施完备,是中国经济发达的地带之一,一旦发生地震灾害,对该区的破坏性和影响程度将会非常巨大(李清河等,2006;谢卓娟等,2012)。江苏—南黄海地区位于东亚大陆边缘,是中国东部沿海地震活动较为活跃的地区之一,历史上中—强震频发。1996年长江口以东海域的 M_s 6.1级地震与1984年南黄海海域的 M_s 6.2级地震都曾对江苏沿岸和长江三角洲局部地区造成强烈震感,引起群众极大惊慌(刘绍文,2013)。21世纪以来,该区共发生过8次4.5级以上地震,中—强震频发使得对该地区地震活动特性进行准确评估的需求也越来越迫切。此外,随着中国沿海经济的高度发展以及对海岸海洋开发程度的不断加大,地震灾害对海域及沿海地区海洋经济和工程建设活动的威胁也将更加突出(刘武英,1999)。江苏—南黄海地区地震活动特性及孕震构造环境深入研究具有重要的现实意义。然而,前人相关工作中由于长期把陆域和海域分开来处理,且地质与地球物理资料也不够完备,对该区的地震地质研究还远未达到这一目标,尚需要深入研究。

前人对江苏—南黄海地区的地震地质背景与区域构造开展了研究,并提出了该区地震构造模式。谢华章(1998)研究了长江中下游—南黄海地震带的地震活跃期、幕划分及其发展趋势。李强和徐桂明(2001)借助灰色预测模型理论,预测了长江中下游—南黄海地震带未来的地震形势。谢卓娟等(2012)根据历史地震资料,做出了长江下游—南黄海400年以来地震统计区的震级—时

间(M-T)图与1450年以来地震统计区的震级—时间(M-T)图,分析了该区地震活动的时间分带性。汪素云等(1990)指出黄海地区历史地震活动呈现较为明显的分区性,南黄海地震带向北有一中等强度的地震带直达山东半岛,往西和扬州—铜陵地震带相接,南黄海地震带的地震活动明显强于相邻的两个地震带。此外,由北至南,黄海的中强震活动差异较大,分布极不均匀,南黄海地震活动的强度与频度都远大于北黄海。据历史资料,有16次6级以上地震分布于 $32^\circ\sim 34^\circ\text{N}$, $121^\circ\sim 123^\circ\text{E}$ 的范围内,包括1846年8月4日发生于南黄海的7级地震——历史记载南黄海曾发生过的最大地震(仇中阳和林叶青,2001)。南黄海 34°N 以北的大片海域,却只发生过4次6级以上强震。

多期构造运动和漫长的地质演化历史造成了江苏—南黄海地区复杂的地质构造,郯庐断裂、苏北—滨海断裂、嘉山—响水断裂、无锡—宿迁断裂等大型区域断裂带相间分布于此,这些活动断层控制了该区地震活动(侯方辉和张志珣,2005)。诸多研究表明,苏北—滨海大断裂是一条活动强烈的断裂构造,其运动造成了该区几次较大的地震活动(汪素云等,1990;仇中阳和林叶青,2001;徐杰等,2003;魏光兴等,1991)。王斌等(2008a)进一步提到,震级较大的地震主要集中分布在南黄海南部坳陷和勿南沙隆起区这两个地带。另外,在区域深部构造研究方面,刘光鼎(1992)指出重力异常梯度带、地壳厚度陡变带和磁异常突变明显的地球物理梯度带基本都是地震活动的潜在区域。彭艳菊等(2008)的研究表明地壳厚度过渡区和布格重力异常在空间分布上与南黄海地区强震构造带存在明显的对应关系。

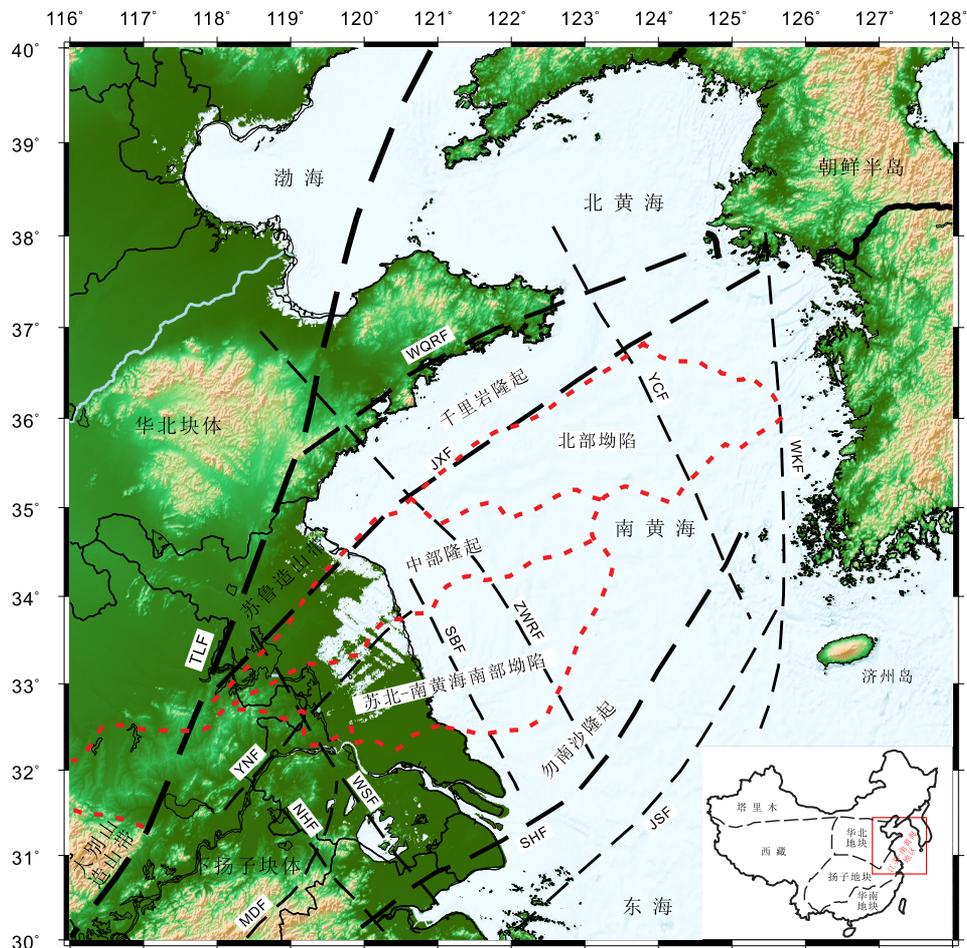
区域地质上,江苏陆区和南黄海海域的基底同属于华南下扬子地块(邢涛等,2005;张训华,2008;郝天珧等,2010),因此,几条大型断裂带从陆地自然延伸至海域,作为主要的边界断裂控制

了该区地震活动特征。然而, 以往的研究大多是分开讨论该区陆域和海域的地震活动, 缺乏对整个区域构造方面的深入分析。尤其值得关注的是, 近年来国际学术界开始关注深部构造对地表变形的控制作用, 并强调从多个维度来综合研究区域地震地质 (Cloetingh et al., 2005, 2006, 2007, 2009; Ter Voorde et al., 2007; Dmitrienko et al., 2016)。另外, 前人对该区地震构造研究工作中多采用单一的方法或数据, 比如根据构造地质资料分析孕震构造环境, 或利用地球物理观测探索地震空间格局和发震机制。本文试图综合地质学和地球物理学方法来研究该地区地震活动的时空分布格局, 同时结合陆域与海域的其他地质、地球物理资料, 深入讨论深部构造对地表孕震过程的

控制作用。最后, 据此提出了一个可能适用于中国近海地区地震发生的成因模式。

2 区域地质背景

黄海是位于中国大陆与朝鲜半岛之间的一个半封闭大陆架盆地, 平均水深 44 m; 海底较缓, 具有西浅东深、北浅南深的地形特征, 最深处位于济州岛附近的东南部 (王颖等, 2013; Wang et al., 2014)。根据其地质、地球物理差异, 以山东半岛最东端的成山角和朝鲜半岛的长山串之间的连线为界, 黄海可进一步分为北、南黄海 (图 1)。北黄海属于华北地块之上的中生代断陷, 而江苏—南黄海地区属于华南地块。黄海邻近我国华北、华南两大块结合带以及中国东部大陆



TLF: 郯庐断裂; WQRF: 五莲-青岛-荣城断裂; JXF: 嘉山-响水断裂; YNF: 盐城-南洋岸断裂; SBF: 苏北-滨海断裂; ZWRF: 淄博-五莲-日照断裂; NHF: 南京-湖熟断裂; WSF: 无锡-宿迁断裂; MDF: 茅东断裂; YCF: 黄海中央断裂; SHF: 苏州-湖州断裂; JSF: 江山-绍兴断裂; WKF: 朝鲜半岛西缘断裂带

图1 江苏—南黄海地区构造区划及主要断裂系统示意图

Fig. 1 Sketch showing the subdivision and main fault systems of the Jiangsu and Southern Yellow Sea (JSYS) area

边缘的洋陆过渡带, 区域地质复杂, 构造变形强烈(赵淑娟等, 2017)。

研究区江苏—南黄海地区从北到南可依次划分出千里岩隆起、北部坳陷、中部隆起、苏北—南黄海南部坳陷和勿南沙隆起等五个构造单元(Zhang et al., 2007; 王斌等, 2008a; 赵淑娟等, 2017)。该区广泛分布不同规模的断裂带体系, 以NW、NNE和NE向为主, 许多断裂彼此交汇, 部分断裂从江苏陆区一直延伸至黄海海域(图1)。其中, 五莲—青岛—荣城断裂(WQRF)、嘉山—响水断裂(JXF)和苏州—湖州断裂(SHF)等断裂从陆域一直延伸至海域, 构成了控制南黄海地区地震活动的关键断裂带。

黄海及其邻区经历了漫长而复杂的地质演化(Zhang, 2008; 邢涛等, 2014; 赵淑娟等, 2017)。新元古代早期, 发生在扬子和华夏古陆块之间的晋宁运动(~900 Ma)导致华南地块的形成(Li et al., 2002), 此后华南地块保持构造稳定, 沉积了古生代—三叠纪海相地层; 中生代早期, 印支运动导致华北和华南地块的碰撞和拼贴, 此后该区沉积了陆相层序, 并伴随抬升和剥蚀, 部分地层缺失。晚白垩纪和新生代早期, 江苏北部和南黄海地区经历了因地幔物质上涌导致的地壳伸展和区域裂陷, 随后, 中新世坳陷阶段和第四纪热

沉降阶段接踵而至, 形成目前的地貌和构造格局(Ren et al., 2002; Dmitrienko et al., 2016; 赵淑娟等, 2017)。总之, 黄海是一个在下扬子地块前三叠系基底上发育起来的中—新生代裂陷盆地。

3 数据与方法

用于本次分析的地震数据包括江苏—南黄海地区的仪器记录地震和历史地震数据。1970年, 江苏—南黄海地区建立了地震监测站, 此后该区地震台网数据得以不断积累。除了观测数据, 我们还挑选了由顾功叙等(1983)编撰的《中国地震目录(公元前1831~公元1969年)》的历史地震数据。此外, 还整合了前人相关数据(刘红桂等, 1999; 赵根模等, 1999; 杨港生等, 2000; 仇中阳和林业青, 2001; 田建明等, 2004; 吴戈, 2004; 王斌等, 2008b)。值得一提的是, 与以往研究相比, 笔者不仅利用该区已有的各类地震数据, 还增加了2008年之后的新地震数据, 从而能较为全面地研究该地区地震活动的时空特征。

考虑到4.5级及以上的地震($M_L \geq 4.5$)可能是具有破坏性的最小事件, 且能够在历史地震目录中有充分记录, 笔者只选择震级在4.5级以上的地震事件用于本次分析。从公元288年到2015年的所有数据中共收集到111个地震($M_L \geq 4.5$)数

表1 江苏—南黄海地区 $M_L \geq 5$ 事件的震源机制解

Table 1 Earthquake focal mechanism for the $M_L \geq 5$ events in the JSYS area

发震时刻	纬度/(°N)	经度/(°E)	深度/km	震级(M_L)	震源机制解	发震断层性质
1979.07.09	31.27	119.15	12.0	6.0		逆冲走滑
1984.05.21	32.29	121.36	16.0	6.2		走滑
1994.07.26	35.02	124.50	17.0	5.8		走滑
1996.11.09	31.5	123.60	29.0	6.1		走滑
2012.07.20	33.04	119.57	15.0	5.0		走滑
2013.04.20	35.18	124.55	10.0	5.1		走滑
2014.03.31	36.87	124.42	10.0	5.1		正断走滑

据, 包括发震时间、震中和震级等信息。表1展示了7个 $M_L \geq 5$ 事件及其震源机制信息。然而, 在这111个地震数据中, 由于文件不完整, 从288年到1494年只有9个事件可用。鉴于如此大的时间段里发生如此稀少地震记录, 可能会影响对区域地震活动特征的认识, 因此, 在后续的时间序列分析中没有包括这9个事件(图2)。

另外, 本次研究中的区域现代构造应力场资料来自世界应力图网站(<http://www.world-stress-map.org>), 数据源包括地震震源机制、钻孔崩落、钻井诱导缝、地应力测量和活动断层滑动等地质、地球物理资料。利用这些数据构建了中国及邻区现代构造应力场模式。用于深部构造分析的自由空间重力异常资料来自于Bureau Gravimétrique International网站(<http://bgi.omp.obs-mip.fr/>)提供的地球重力模型EGM2008, 地壳厚度与磁异常数据来源于相关文献资料。

4 结果

基于以上数据和方法, 对江苏—南黄海地区所有选定的地震数据进行了统计分析, 并给出了该区地震活动的时空分布整体特征。

4.1 地震活动时间分布特征

江苏—南黄海地区 $M_L \geq 4.5$ 地震事件的震级—

时间(M-T)分布如图2所示, 该区地震活动整体呈活跃期与平静期交替的特征。自1495年以来, 该区一共经历了以下三个地震活跃期: 1495~1546年, 1615~1789年和1839~2015年(表2)。第一个活跃期从1495年到1546年, 共有9个震级大于4.5级的地震记录, 其中6.5级以上的地震有4次。1547年到1614年这67年间, 没有任何大于4.5级的地震记录, 说明该段时间为地震平静期。第二次活跃期从1615年到1789年, 共有18个震级大于4.5级的地震记录, 其中5次6.0级以上的强震; 接

表2 江苏—南黄海地区地震活动的时间分区

Table 2 Temporal segmentation of the seismicity in the JSYS area

	时间跨度	年数	$M \geq 4.5$	$M \geq 6.0$	$M \geq 6.5$
A_1	1495~1546	51	9	4	4
Q_1	1547~1614	67	0	0	0
A_2	1615~1789	174	18	5	0
Q_2	1790~1838	48	0	0	0
A_3	1839~2015	176	76	22	7
a_1	1839~1879	40	22	12	4
q_1	1880~1902	22	0	0	0
a_2	1903~1949	46	19	6	3
q_2	1950~1970	20	0	0	0
a_3	1971~2015	44	35	4	0

注: 上表中A(a)代表活跃期, Q(q)代表平静期, 其脚注数字代表分期

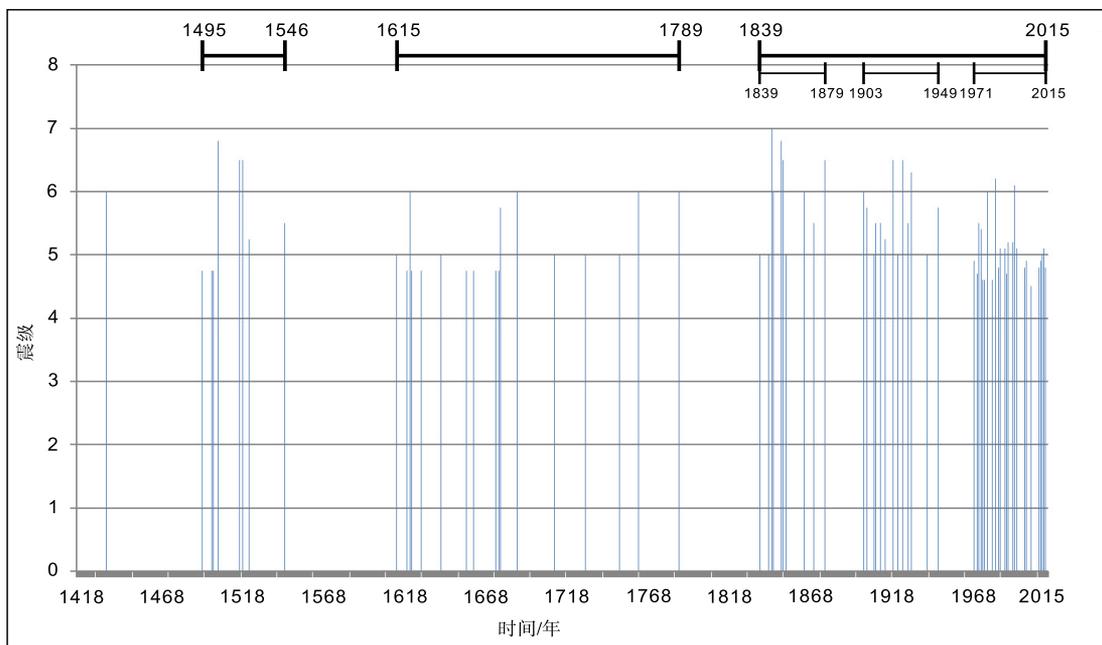


图2 江苏—南黄海地区地震活动的震级—时间分布

Fig. 2 Magnitude-Time pattern of seismicity in the JSYS area

着是1790年到1838年这长达48年平静期。自1839年以来,该区进入第三个地震活跃期,一共有76个震级大于4.5级的地震记录,其中震级大于6.0级的地震记录有22个,6.5级以上的强震7次。

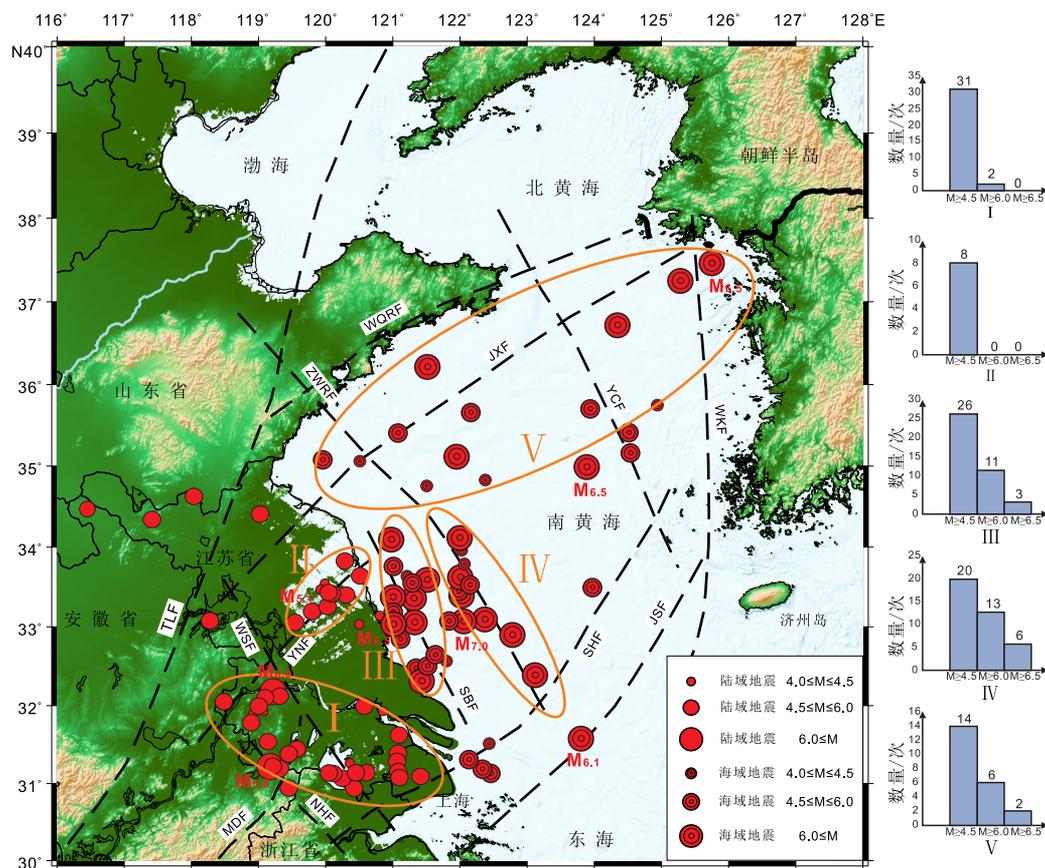
值得一提的是,在第三个地震活跃期(1839~2015)期间,由于自1970年以来该区地震台网的布设与连续观测,地震记录相对丰富。在该时段丰富数据基础上,第三个地震活跃期又可以划分为三个亚阶段,如表2所示,三个亚阶段中,活跃阶段和平静阶段的持续时间分别为40~46年和20~22年。

总体而言,江苏—南黄海地区的地震平静期约持续60年;第二次和第三次活跃期都持续了170年以上,但是第一次活跃期持续时间相对较短,只有50年左右,这可能是因年代较为久远,数据记录不足等原因。此外,根据地震—时间分布规律来看,

江苏—南黄海地区目前仍处于第三个地震活跃阶段,这表明未来该区仍可能会发生一些中、强地震,但是这些地震的具体时间尚不能确定。

4.2 地震活动空间分布特征

如图3所示,江苏—南黄海地区的地震活动表现出强烈的空间集群分布特点,且主要集中于五个局部区域。其中,江苏陆区的地震主要发生在江苏南部—上海地区(I区)和江苏中部盐城附近(II区)。I区地震带表现出显著的NW向集群分布,地震数量较多且震级较大;该区共发生31次4.5级以上地震,其中包括2次6.0级的强震。对II区而言,地震则呈NE向条带状分布,共有8次4.5级以上的地震发生,最大震级为5.1级。江苏北部的地震活动数量稀少,也较为分散,但总体上仍呈EW向分布。南黄海海域的地震活动主要发生在III区、IV区和V区,其中大部分地震发生在III区



TLF: 郟庐断裂; WQRF: 五莲-青岛-荣城断裂; JXF: 嘉山-响水断裂; YNF: 盐城-南洋岸断裂; SBF: 苏北-滨海断裂; ZWRF: 淄博-五莲-日照断裂; NHF: 南京-湖熟断裂; WSF: 无锡-宿迁断裂; MDF: 茅东断裂; YCF: 黄海中央断裂; SHF: 苏州-湖州断裂; JSF: 江山-绍兴断裂; WKF: 朝鲜半岛西缘断裂带

图3 江苏—南黄海地区地震活动空间分布图(1495~2015)

Fig. 3 Spatial pattern of seismicity in the JSYS area during 1495~2015

和 IV 区, 并且呈明显的 NW 向条带状密集分布, 数量众多。III 区共有 26 次 4.5 级以上的地震记录, 其中 11 次 6 级以上强震, 包括 3 次震级为 6.5 级的强震。IV 区共有 20 次 4.5 级以上的地震记录, 其中 6 次 6.5 级以上强震, 最大震级为 7.0 级。对于 V 区而言, 地震活动性略低于 III 区和 IV 区, 空间上也有明显的 NE 分布特征, 该区共有 14 个震级大于 4.5 级的地震记录, 包括 2 次震级为 6.5 级的强震。此外, 长江口地区也有一系列地震记录, 包括 5 次 4.5 级以上的地震, 并有一次震级为 6.1 级的地震记录。总的来说, III 区和 IV 区, 也即南部拗陷和勿南沙隆起区, 是江苏—南黄海地区地震活动最活跃的地区。

5 讨论

5.1 断裂带分布与地震活动

将江苏—南黄海地区的地震活动空间分布与该区的活动断裂带相叠加, 两者显示出密切关系, 也即地震活动通常发生于断裂带或断裂交汇部位。据图 3 所示, 地震活动 I 区位于无锡—宿迁断裂 (WSF)、南京—湖熟断裂 (NHF) 和茅东断裂 (MDF) 交汇处; 而 II 区与盐城—南洋岸断裂 (YNF) 重合。苏北—滨海断裂带 (SBF) 位于 III 区内, IV 区与淄博—五莲—日照断裂 (ZWRf) 这条 NW 向断裂有着非常密切的联系。在 V 区中, 地震主要沿从陆域一直延伸至海域的嘉山—响水断裂 (JXF) 分布, 发生在长江口的地震主要分布在苏

州—湖州断裂 (SHF) 附近。此外, 过去 600 年来这些断层带附近频发地震也证明了断层带依旧活跃, 这表明对该区活动断层的监测是防震减灾工作的重要环节。

断裂带及交汇处是深部物质非均匀性在地表的表现, 其力学性质较弱, 在合适的构造应力场作用下, 断裂易于重新活动从而引发地震 (Zoback, 2006; Zhang et al., 2010)。根据我们的研究结果, 江苏—南黄海地区 6.0 级以上地震活动主要发生在南黄海西南部的苏北—南黄海南部拗陷和勿南沙隆起区, 表明该地区构造变形较为活跃。NW 向的苏北—滨海断裂 (SBF) 和淄博—五莲—日照断裂 (ZWRf) 穿过该区, 作为主要的发震断裂控制了该区的地震活动。此外, 该地震活动区也位于江苏陆块和南黄海大陆架之间的过渡地带, 海—陆过渡带区普遍存在较强的地质结构与深层构造差异, 也易于断层的产生与活动, 这对地震发生具有促进作用。

5.2 现代构造应力场与地震活动

现代地壳构造应力是区域浅层构造变形的主要驱动力, 因此地震的孕震过程必然受到现代构造应力场影响 (王小亚等, 2002)。结合钻孔崩落、震源机制和应力测量数据, 作者给出了中国沿海及邻区的现代构造应力状态 (图 4)。如图所示, 中国东部沿海的构造应力场主要由两大地球动力学系统所控制: 西部新生代印度—欧亚板块的碰撞挤压和东部菲律宾海板和太平洋板块对欧亚大陆的俯冲 (Yin, 2012; 张培震等, 2014)。大陆碰撞产

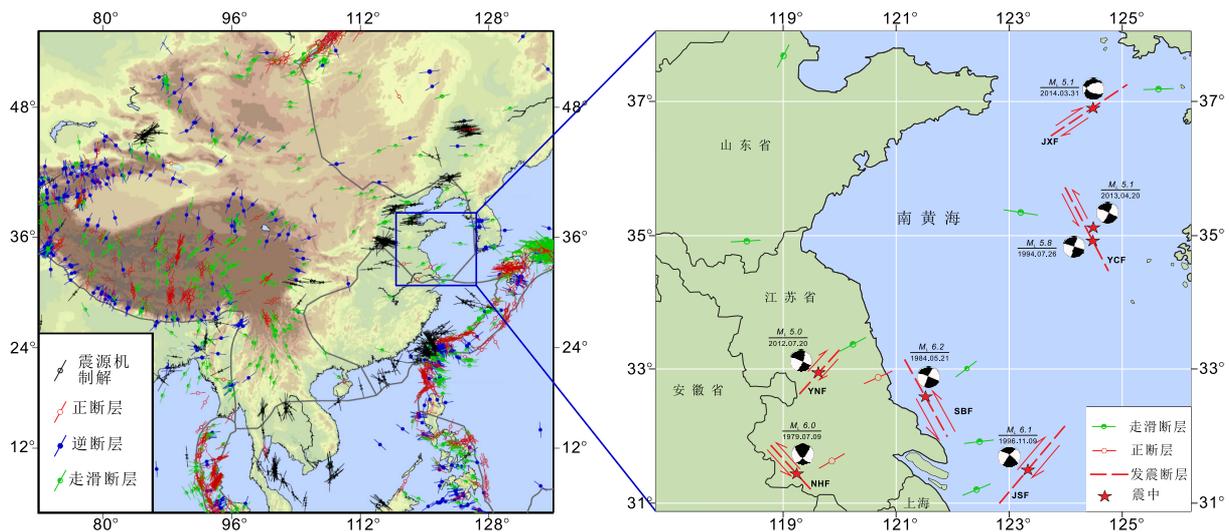


图 4 中国大陆及江苏—南黄海地区现代构造应力场

Fig. 4 Present-day tectonic stress field for China and the JSYS area

生的挤压应力可以传输至远离板块边界 1000 km 以上的东部沿海地区, 而东部板块俯冲相关应力也属于压应力。因此, 中国东部海域现代构造应力场主要特征为以水平至近于水平的挤压作用为主, 方向则由北部的 NE 向南逐渐转为 NEE、EW、SEE 至 SE 向 (徐杰等, 2003, 2012; 孙建中和杨少敏, 2005), 呈现复杂变化特征。另外, 就现代构造应力场的强度大小而言, 南黄海和渤海整体相近, 都大于东海地区, 这也是为何东海的地震活动较为少见 (除了琉球海沟处板块俯冲所致的地震外), 但在渤海和南黄海却较为集中的原因之一 (徐杰等, 2012)。

具体到江苏—南黄海地区, 如表 1 所示, 7 个 $M_L > 5.0$ 地震事件的震源机制解中, 其中有 5 个为走滑型, 2 个为斜滑型 (其中一个逆冲走滑、一个正断走滑)。显然, 这些震源机制解与前已述及的中国东部海域区域构造应力场性质一致, 也暗示了区域构造应力场对地震发育的控制作用。此外, 结合 World Stress Map 给出的东亚应力场整体认识和这些震源机制解的应力信息, 笔者认为江苏—南黄海地区现代构造应力场方向主要为 NEE-EW, 且断层活动性质以走滑为主。

除了上述来自板块边界的现代构造应力场影响之外, 江苏—南黄海地区陆域和近海大陆架之间因地形高程差异引起的重力势能差也有助于应力积累, 从而触发地震产生。数值模拟表明, 青藏高原与其邻区之间因地形高程差异引起的重力势能是驱动我国西部新生代板内变形和造山作用的重要动力源 (Flesch et al., 2001; Liu et al., 2003)。Zhang 等 (2010) 用这一机制来解释青藏高原东北缘的地震成因。郑勇等 (2013) 也提出重力势能在一定程度上构成了龙门山断裂系上大地震的孕震环境。显然地, 江苏陆区和南黄海近海大陆架之间的地形高程差异也能产生一定的重力势能, 这一重力势能可作为促进该区域地震形成的潜在附加驱动力。

5.3 深部构造与地震孕育过程

地壳或岩石圈尺度的地球动力学过程是驱动地表形变的深部因素。笔者据此利用地球物理数据对江苏—南部黄海地区的深部构造特征进行了分析, 并讨论其对该区孕震机制的影响。

图 5 展示了江苏—南黄海地区自由空气重力

异常分布格局特征。纵观整个江苏—南黄海地区, 陆地部分以低值负异常为主, 其中, 江苏北部和南部少部分区块为正异常; 海域部分则表现为高、低值相间分布。此外, 重力异常从陆地到海洋呈现出逐渐升高的趋势。除朝鲜半岛西岸南端 (济州岛西北向) 存在着一条 NW 向延伸的条带状高值异常带以外, 整个南黄海地区的空气重力异常基本上都呈 NE 或近 NE 向展布的正 (隆起区)、负 (拗陷区) 相间条带。除了千里岩隆起和勿南沙隆起两个隆起区的重力高值带为 NE 向外, 其他异常条带都是从 NE 向而后逐渐转为近 EW 向, 并继续向南黄海东部延伸, 尤其是北部拗陷区的重力低值带一直延伸到 125°E 附近, 是整个南黄海海域规模最大的重力低值带。该特征不仅反映出南黄海隆、拗相间的基本构造格局, 同时也展示出南黄海海域具有以 NE-NEE 向异常为主的地球物理场特征。

江苏陆域部分除了北、南部有少量重力异常高值带, 整体以重力异常低值带为主, 尤其在江苏中部地区, 有一大片重力值几乎相等的低值带, 该低值带与东部海域的苏北—南黄海南部拗陷低值带相连; 该低值带北部与中部隆起分界处有一明显的近 NE 向的重力高值带, 南部与勿南沙隆起交界处有小范围重力异常高值区。这也从地球物理角度印证了江苏—南黄海地区构造体系的统一性: 中部隆起、苏北—南黄海南部拗陷和勿南沙隆起三个构造单元既有南黄海海域部分又有江苏陆域部分。

嘉山—响水断裂 (JXF) 作为千里岩隆起和北部拗陷两个构造单元之间的分界线, 正好处在重力异常过渡带上, 而作为勿南沙隆起南缘的苏州—湖州断裂 (SHF) 也处于重力高、低值过渡带上。V 区地震大部分发生于北部拗陷边缘处, 即重力异常过渡带, I 区位于江苏南部, 同样有大部分地震发生在重力异常过渡带。重力异常梯度带区的岩石物理性质不均一性强, 易于应力/应变集中, 是地震活动的易发区带。

除了重力异常之外, 该区域的地壳厚度和航磁异常分布也揭示出地震活跃区的深部地球物理特征。郝天珧等 (1998) 指出南黄海大部分地区的地壳厚度为 28~29 km, 仍属于大陆地壳, 但在 $32^\circ\sim 35^\circ\text{N}$, $121^\circ\sim 124^\circ\text{E}$ 范围内, 莫霍面起伏相当

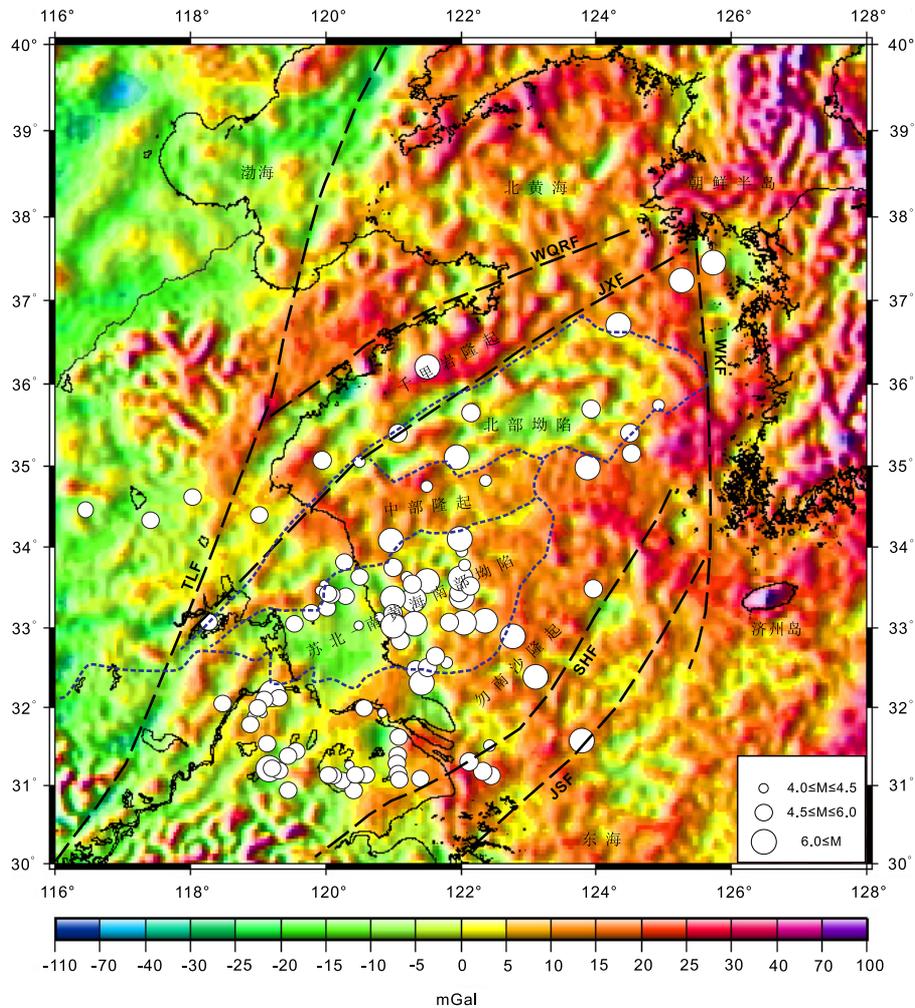


图5 江苏—南黄海地区自由空气重力异常与主要断裂系统分布

Fig. 5 Free air gravity anomaly pattern and major fault systems in the JSYS area

复杂。大部分强震也集中分布在该范围内,且地壳厚度变化梯度带与区域断裂有较好的对应关系(Li et al., 2012)。另外,南黄海地区的航磁异常研究也表明在 $32^{\circ}\sim 35^{\circ}\text{N}$, $122^{\circ}\sim 124^{\circ}\text{E}$ 范围内,存在着变化剧烈的磁异常梯度带(Zhang et al., 2007; 张训华, 2008; 谢天峰和付永涛, 2008),这一区域大致对应南黄海南部盆地和勿南沙隆起区,是江苏—南黄海地区构造作用最强烈的地带之一。

由此可见,区域自由空气重力异常、地壳厚度和航磁异常等地球物理资料均揭示出江苏—南黄海地区的勿南沙隆起和南部拗陷这一地震活跃区存在显著的深部构造异常,整体表现为物性差异对比强烈,梯度变化带显著,这也暗示了地震活动与深部结构存在一定的关联。在今后的区域地震活动研判和防震减灾评估工作中,除了要加

强传统的区域活断层探测之外,还要关注深部构造特征,以便更好地掌握区域地震活动特性。

5.4 江苏—南黄海地区的地震孕震模式

结合上述对江苏—南黄海地区的活动断裂带、现代构造应力场和深部地球物理特征综合研究,并考虑深部和表层构造的耦合关系,我们绘制了研究区近期主要地震的地震构造示意图。

如图6所示,在菲律宾海板块斜向俯冲和印度—欧亚大陆碰撞的水平挤压力联合作用下,这7次5级以上地震的震源机制都显示出明显的走滑性质。除了1996年的那次6.3级地震,其余6次地震的震源深度皆为 $10\sim 15\text{ km}$,这与中国华南地区地震震源统计深度一致(张国民等, 2002)。实际上,该区震源深度也接近下扬子区壳内的脆—韧性转换深度(李成等, 2001)。另外,无论发震断

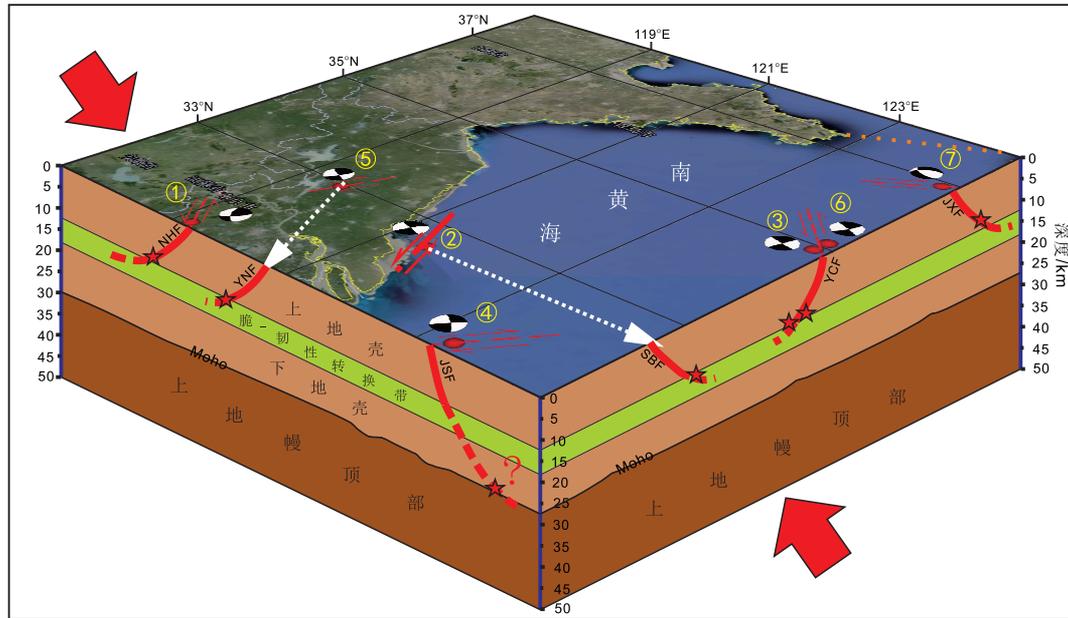


图6 江苏—南黄海地区近期主要地震的地质构造示意图

Fig. 6 Seismotectonic model for the recent major earthquakes in the JSYS area

层在上地壳显示为或高或低的角度，它们都倾向于在韧性剪切带终止，并表现出典型的犁式断层。

然而，1996年的6.3级地震震源深度为29 km，发生在下地壳且接近莫霍面深度。这表明发震断层穿透了韧性剪切带，到达了下地壳，且下地壳有足够强度来支撑地震发生。江苏—南黄海地区所在的下扬子地块具有相对较高的地热背景，平均热流为65 mW/m² (王良书等, 1995)，因此下地壳应该为塑性而不能发生脆性破裂。然而，Maggi等(2000)曾认为，当大陆下地壳非常干燥时，下地壳也会有地震发生。就该地区而言，笔者不了解江苏—南黄海地区下地壳含水量信息，无法判断是否为干燥状态；另外，这次地震震源深度的精确定位也还需进一步确认。

最后，以江苏—南黄海地区为例，进一步提出了中国海岸带区的地震成因机制(图7)。断层是地震的载体，所有的(潜在)地震都与活动断裂带有关。地震断层有时不容易在地表识别，尤其是隐藏在地壳深处的隐伏盲断层，这种情况下，可利用综合地球物理解释来识别深部断层，断层或断裂带多与地球物理梯度带或岩石物性突变区有关。断裂带活动引起岩石物性差异，易于应力/应变局部集中。由于中国海位于东部大陆架区，除了来自西部印度—欧亚大陆碰撞和东部菲律

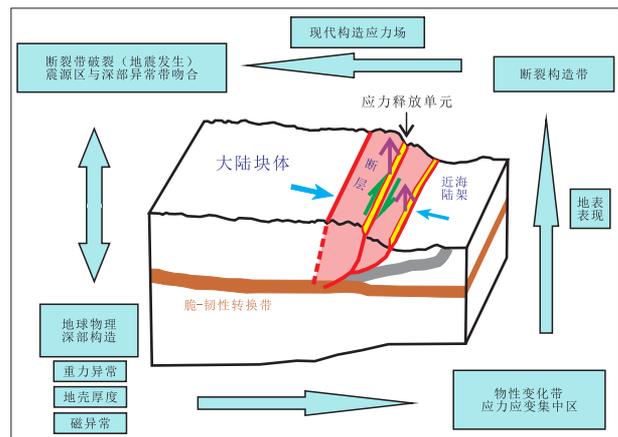


图7 中国沿海地区地震的发震过程示意图

Fig. 7 Cartoon showing the seismicogenic process for the offshore China Seas

宾海板块俯冲作用的板块边界作用力之外，还有板块内部因克拉通和大陆边缘之间因地形高程差产生的重力势能，它们的联合作用为地震活动提供了动力源。综上所述，中国海岸带独特的地质地貌格局和活动断裂体系是地震发生的潜在原因，这也清楚地表明了深部构造对地表变形的影响。

6 结论

结合江苏—南黄海地区过去600年来的历史和仪器地震数据，以及地质、地球物理综合资料，

作者对该区地震活动的时空分布特征以及孕震构造环境进行了深入研究, 获得如下认识。

该区地震活动在时间上显示出活跃期和平静期的交替变化。自 1495 年以来共经历三个地震活跃期, 第一个活跃期时间较短, 后两个活跃期都持续约 170 年, 但两次平静期持续均约为 60 年。目前江苏—南黄海地区仍处于第三个地震活跃期, 未来仍有发生地震的可能。

该区地震活动在空间上整体呈 NE 和 NW 向带状分布, 与大型活动断层有关, 断裂带交汇处易发生地震。其中, 地震相对活跃的勿南沙隆起和南部拗陷区均存在显著的深部构造异常。

地震活动是一个由深部构造和地表断层作用共同控制的复杂动力学过程。西部印度—亚欧新生代大陆碰撞的远距离效应和东部菲律宾海板块的俯冲作用为中国海岸地震发生提供了主要的驱动力, 而板块内部因克拉通和东部大陆架之间的地形高程差引起的重力势能也能在一定程度上提供动力。

致谢: 南京大学地球科学与工程学院于大勇工程师协助绘制了图 1 和 3, 且由 GMT 软件绘制。构造应力场数据来自世界应力场网站 (<http://world-stress-map.org>), 重力资料来自 Bureau Gravimétrique International (<http://bgi.omp.obs-mip.fr/>) 提供的 EGM2008。

参考文献 (References):

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.

郝天瑛, 黄松, 徐亚, 等. 2010. 关于黄海深部构造的地球物理认识[J]. 地球物理学报, 53(6): 1315–1326.

郝天瑛, 刘伊克, 徐万哲. 1998. 黄海和邻区重磁场及区域构造特征[J]. 地球物理学进展, 1: 28–40.

侯方辉, 张志珣. 2005. 南黄海新构造运动[J]. 海洋地质动态, 21(11): 8–10.

李成, 王良书, 杨春. 2001. 下扬子区岩石圈双层脆韧性过渡带叠置的流变学证据[J]. 地质论评, (3): 245–249.

李强, 徐桂明. 2001. 长江中下游—南黄海地震带地震趋势研究[J]. 西北地震学报, 23(3): 265–268.

李清河, 黄耘, 金淑梅, 等. 2006. 应大力加强海洋区域防震减灾工作[J]. 华南地震, 26(1): 175–179.

刘光鼎. 1992. 中国海地球物理场和地球动力学特征[J]. 地质学报, 4: 300–314.

刘红桂, 杨彩霞, 南金生, 等. 1999. 南黄海地震区的地震活动性研究[J]. 华北地震科学, 3: 75–80.

刘绍文. 2013. 中国海域海洋地震灾害[C]// 王颖, 刘瑞玉, 苏纪兰. 中国海洋地理 (第三版). 北京: 科学出版社: 745–752.

刘武英. 1999. 中国海域地震研究综述[J]. 国际地震动态, (8): 1–5.

彭艳菊, 孟小红, 吕悦军, 等. 2008. 我国近海地震活动特征及其与地球物理场的关系[J]. 地球物理学进展, 23(5): 1377–1388.

仇中阳, 林叶青. 2001. 江苏—南黄海地区断裂带附近的小震活动与主震的关系[J]. 地震学刊, 21(1): 19–26.

孙建中, 杨少敏. 2005. 用 GPS 资料揭示现今中国大陆构造运动[J]. 大地测量与地球动力学, 3: 75–80.

田建明, 徐徐, 谢华章, 等. 2004. 江苏及南黄海地区历史地震类型分布特征[J]. 地震学报, 26(4): 432–439.

王斌, 梁雪萍, 周健. 2008a. 江苏及其周边地区断裂活动性与地震关系的分析[J]. 高原地震, 20(1): 38–43.

王斌, 梁雪萍, 周健. 2008b. 江苏省盐城地区地震活动特征及震害分析[J]. 华南地震, 28(3): 118–126.

王良书, 李成, 施央申, 等. 1995. 下扬子区地温场和大地热流密度分布[J]. 地球物理学报, (4): 469–476.

汪素云, 时振梁, 环文林. 1990. 中国近海地震活动特征[J]. 海洋学报, 12(2): 194–199.

王小亚, 朱文耀, 符养, 等. 2002. GPS 监测的中国及其周边现时地壳形变[J]. 地球物理学报, 2: 198–209.

王颖, 刘瑞玉, 苏纪兰. 2013. 中国海洋地理 (第三版) [M]. 北京: 科学出版社.

魏光兴, 郭爱香, 胡政, 等. 1991. 黄海地震带地震活动的分区特征—兼论黄海地震带的厘定[J]. 地震, 6: 68–72.

吴戈. 2004. 黄海及其邻区的历史地震[J]. 中国地震, 20(3): 299–305.

谢华章. 1998. 长江中下游—南黄海地震带地震活动趋势分析[J]. 地震学刊, (3): 1–6.

谢天峰, 付永涛. 2008. 南黄海布格重力异常的小波多尺度分析[J]. 海洋科学, 32(11): 60–63.

谢卓娟, 吕悦军, 彭艳菊, 等. 2012. 长江下游—南黄海地震带地震活动性研究[J]. 地震, 32(4): 11–21.

邢涛, 张训华, 张维冈. 2005. 南黄海区域地质构造研究进展[J]. 海洋地质动态, 12: 6–9+38.

邢涛, 张训华, 张向宇. 2014. 南黄海磁性基底特征分析和综合解释[J]. 海洋与湖沼, 5: 946–953.

徐杰, 马宗晋, 陈国光, 等. 2003. 中国大陆东部新构造期北西向断裂带的初步探讨[J]. 地学前缘, 10 (特刊): 193–198.

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[J]. 地学前缘, 4: 1–7.

杨港生, 赵根模, 邱虎. 2000. 中国海洋地震灾害研究进展[J]. 海洋通报, 4: 74–85.

张国民, 李丽, 马宏生, 等. 2002. 中国大陆地震震源深度及其构造含义[J]. 科学通报, (9): 663–668+721–722.

张培震, 张会平, 郑文俊, 等. 2014. 东亚大陆新生代构造演化[J]. 地震地质, 36(3): 574–585.

张训华. 2008. 中国海域构造地质学[M]. 北京: 海洋出版社.

赵根模, 陈化然, 杨港生. 1999. 黄海地震活动与地震构造的初步研究[J]. 华北地震科学, 17(2): 28–35.

赵淑娟, 李三忠, 索艳慧, 等. 2017. 黄海盆地构造特征及形成机制[J]. 地学前缘, 24(4): 239–248.

郑勇, 葛黎, 谢祖军, 等. 2013. 芦山与汶川地震震区地壳上地幔结构及深部构造孕震环境[J]. 中国科学 (D 辑), 43: 1027–1037.

Cloetingh S A P L, Ziegler P A, Bogaard P J F, et al. 2007. TOPO-EUROPE:

- The geoscience of coupled deep Earth-surface processes [J]. *Global and Planetary Change*, 58: 1–118.
- Cloetingh S, Cornu T, Ziegler P A, et al. 2006. Neotectonics and intraplate continental topography of the northern Alpine Foreland [J]. *Earth-Science Reviews*, 74: 127–196.
- Cloetingh S, Thybo H and Faccenna C. 2009. TOPO-EUROPE: The geoscience of coupled deep earth-surface processes-peter ziegler dedication [J]. *Tectonophysics*, 474: 1–2.
- Cloetingh S, Ziegler P A, Beekman F, et al. 2005. Intraplate deformation and 3D rheological structure of the Rhine Rift System and adjacent areas of the northern Alpine foreland [J]. *International Journal of Earth Sciences*, 94: 758–778.
- Dmitrienko L V, Li S Z, Cao X Z, et al. 2016. Large-scale morphotectonics of the ocean–continent transition zone between the Western Pacific Ocean and the East Asian Continent: a link of deep process to the Earth’s surface system [J]. *Geological Journal*, 51(S1): 263–285
- Flesch L M, Haines A J and Holt W E. 2001. Dynamics of the India-Eurasia collision zone [J]. *Journal of Geophysical Research-Solid Earth*, 106 (B8): 16435–16460
- Li Chunfeng, Wang Jialin, Zhou Zuyi, et al. 2012. 3D geophysical characterization of the Sulu–Dabie orogen and its environs [J]. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 192: 35–53
- Liu M and Yang Y Q. 2003. Extensional collapse of the Tibetan Plateau: Results of three-dimensional finite element modeling [J]. *Journal of Geophysical Research-Solid Earth*, 106(B8): 2361, doi: 10. 1029/2002 JB002248.
- Maggi A, Jackson J A, Mckenzie D, et al. 2000. Earthquake focal depths, effective elastic thickness, and the strength of the continental lithosphere [J]. *Geology*, 28(6): 495–498.
- Ren J Y, Tamaki K, Li S T, et al. 2002. Late Mesozoic and Cenozoic rifting and its dynamic setting in Eastern China and adjacent areas [J]. *Tectonophysics*, 344: 175–205.
- Ter Voorde M, Gaspar-Escribano J M, Juez-Larre J, et al. 2007. Thermal effects of linked lithospheric and upper crustal-scale processes: Insights from numerical modeling of the Cenozoic Central Catalan Coastal Ranges (NE Spain) [J]. *Tectonics*, 26(5): TC5018.
- Wang Pingxian, Li Yuqian and Li Chunfeng. 2014. *Geology of China Seas* [M]. Amsterdam: Elsevier: 79–89.
- Yin A. 2012. Cenozoic tectonic evolution of Asia: A preliminary synthesis [J]. *Tectonophysics*, 488: 293–325.
- Zhang Minghua, Xu Deshu and Chen Jianwen. 2007. Geological structure of the yellow sea area from regional gravity and magnetic interpretation [J]. *Applied Geophysics*, 4(2): 75–83.
- Zhang Peizhen, Wen Xueze, Shen Zhengkang, et al. 2010. Oblique, high-angle, listric-reverse faulting and associated development of strain: The Wenchuan Earthquake of May 12, 2008, Sichuan, China [J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 38: 353–382.
- Zoback M L. 2006. The 1906 earthquake and a century of progress in understanding earthquakes and their hazards [J]. *GSA Today*, 16(4/6): 4–11.