

曹凤娟, 王亮, 李君, 王喜龙, 杨牧萍, 张博. 2015. 南北地震带与华北地块强震间的相关迁移. 地震学报, 37(4): 554-564. doi:10.11939/jass.2015.04.003.

Cao F J, Wang L, Li J, Wang X L, Yang M P, Zhang B. 2015. Relevant migration characteristics of strong earthquakes between the North-South Seismic Belt and North China block. *Acta Seismologica Sinica*, 37(4): 554-564. doi: 10.11939/jass.2015.04.003.

南北地震带与华北地块强震间的相关迁移^{*}

曹凤娟^{1,*} 王亮¹ 李君² 王喜龙¹ 杨牧萍¹ 张博¹

1) 中国沈阳 110034 辽宁省地震局

2) 中国沈阳 110161 沈阳地震台

摘要 地震震源机制解和地应力实测结果表明, 我国大陆地区存在近似于辐射状的区域应力场, 其辐射中心位于青藏地块东部。本文首先定义我国大陆应力场近似辐射中心(35°N 、 100°E)为动力源点, 在此基础上计算了1900年以来我国大陆东部地区(30°N — 44°N 、 104°E — 125°E)所发生的34次 $M_s \geq 6.0$ 地震震中到动力源点的距离与地震发生时间的关系。结果表明, 20世纪南北地震带中北段发生 $M_s \geq 7.0$ 地震后, 华北地块陆续发生了一系列 $M_s \geq 6.0$ 地震, 且有随时间从南北地震带附近大体向东迁移的规律。据此说明, 华北地块的地震主要受控于印度板块作用下青藏地块向我国大陆东部挤压的影响, 在其作用下产生了华北地块 $M_s \geq 6.0$ 地震的系列东向迁移活动。总体来看有4组明显的地震迁移活动, 每组地震“序列”的迁移视速度约为80 km/a。华北地块首发 $M_s \geq 6.0$ 地震距南北地震带中北段最近一次 $M_s \geq 7.0$ 地震的时间间隔约为1个月至11.8年, 且60%的 $M_s \geq 6.0$ 地震发震地点在($39^{\circ}\text{N} \pm 1.5^{\circ}$)区域内。据此推测, 2008年汶川 $M_s 8.0$ 和2013年芦山 $M_s 7.0$ 地震后, 华北地块近年存在发生 $M_s \geq 6.0$ 地震的可能, 晋冀蒙交界和环渤海及其附近地区值得重点关注。

关键词 震源机制 青藏地块 动力源 迁移 华北地块

doi:10.11939/jass.2015.04.003 中图分类号: P315.2 文献标志码: A

Relevant migration characteristics of strong earthquakes between the North-South Seismic Belt and North China block

Cao Fengjuan^{1,*} Wang Liang¹ Li Jun²
Wang Xilong¹ Yang Muping¹ Zhang Bo¹

1) *Earthquake Administration of Liaoning Province, Shenyang 110034, China*

2) *Shenyang Seismic Station, Shenyang 110161, China*

Abstract: The focal mechanism solutions of earthquakes and *in-situ* stress measurement results showed that there was a regional stress field in nearly radial pattern in Chinese mainland, and the radiation center was located in the eastern Qinghai-Xizang (Tibet) block. In this paper we defined the approximate radiation center (35°N , 100°E) in Chinese mainland as the dynamic source point and

* 基金项目 辽宁省科学技术计划项目(2014231003)和辽宁省地震局重点实验室项目(LZ-Z201501-2)共同资助。

收稿日期 2014-08-11 收到初稿, 2015-01-02 决定采用修改稿。

† 通讯作者 e-mail: cao99@sina.com

then calculated the distance between the dynamic source point and the location of 34 earthquakes with $M_s \geq 6.0$ since the year 1900 in eastern part of Chinese mainland (30°N — 44°N , 104°E — 125°E) so as to analyze the relationship between the distance and earthquake occurrence time. The results showed that a series of $M_s \geq 6.0$ earthquakes occurred in North China block after an earthquake with $M_s \geq 7.0$ occurred in North-South Seismic Belt in the 20th century, and they generally migrated eastward from North-South Seismic Belt with time. This also suggested that the earthquakes occurred in North China block should be mainly controlled by the influence of the Qinghai-Xizang (Tibet) block's squeezing to the eastern Chinese mainland under the action of Indian Plate, causing the $M_s \geq 6.0$ earthquakes eastward migrating in the North China block. There were four distinct groups of migrations with velocity about 80 km/a . The interval between the first $M_s \geq 6.0$ earthquake in North China block and the latest $M_s \geq 7.0$ earthquake in North-South Seismic Belt was about 1 month to 11.8 years, and 60% of the $M_s \geq 6.0$ earthquakes were located in the area close to ($39^{\circ}\text{N} \pm 1.5^{\circ}$). Therefore it could be inferred that the $M_s \geq 6.0$ earthquakes probably occur in North China block in recent years after the Wenchuan $M_s 8.0$ earthquake in 2008 and Lushan $M_s 7.0$ earthquake in 2013. Accordingly, we should focus on the junction areas of Shanxi, Hebei, Inner Mongolia, and the circum-Bohai and their surrounding areas.

Key words: focal mechanism; Qinghai-Xizang (Tibet) block; dynamic source; migration; North China block

引言

在中国大陆东西部中间有一条狭长的过渡地带(99°E — 106°E), 它不仅是地势、重力和地壳厚度的梯度带, 而且其地震活动水平之高也为世人瞩目, 这就是人们常说的南北地震带(毛可等, 1997). 在某种程度上, 南北地震带可作为青藏地块向东运动并挤压华北地块的代表地带. 当印度板块运动加剧引起我国大陆西部地块地震活动高潮后, 东部华北地块随之也相应出现地震活动高潮. 20世纪, 一系列大地震沿青藏地块北部边界构造带(南北地震带中北段)连续发生, 包括1920年海原 $M_s 8.5$ 、1927年古浪 $M_s 8.0$ 、1933年叠溪 $M_s 7.5$ 、1954年山丹 $M_s 7.3$ 和民乐 $M_s 7.0$ 、1976年松潘 $M_s 7.2$ 和平武 $M_s 7.2$ 等地震, 说明青藏地块这一条边界构造带在50年左右的时间内活动加强, 从而集中释放出巨大的地震能量. 与此同时华北地块也相继发生了1937年菏泽 $M_s 7.0$ 、1966年邢台 $M_s 7.2$ 、1969年渤海 $M_s 7.4$ 、1975年海城 $M_s 7.3$ 和1976年唐山 $M_s 7.8$ 以及一系列 $M_s \geq 6.0$ 地震. 朱兆才(1994)研究发现, 1966—1976年青藏地块与华北地块发生的 $M_s \geq 7.0$ 地震有相互跳迁的呼应关系. 因此, 继2008年以来南北地震带中北段相继发生了2008年5月12日汶川 $M_s 8.0$ 和2013年4月20日芦山 $M_s 7.0$ 地震后, 接下来华北地块的地震又该如何发展呢?

1998年1月10日张北 $M_s 6.2$ 地震至今, 华北地块 $M_6.0$ 地震平静已达17年多. 2011年1月12日南黄海 $M_s 5.0$ 地震打破了华北地块近5年半时间的 $M_5.0$ 地震平静格局, 之后陆续发生了2013年1月23日辽宁灯塔 $M_s 5.1$ 、2013年4月21日黄海 $M_s 5.0$ 、2013年4月22日内蒙古科尔沁 $M_s 5.3$ 和2013年5月18日黄海 $M_s 5.1$ 等一系列 $M_s \geq 5.0$ 地震. 这种

$M_{5.0}$ 地震密集连发的现象为历史所罕见, 且上述 $M_s \geq 5.0$ 地震在空间上明显呈带状分布, 使得华北地块 $M_{6.0}$ 地震的形势越发复杂而严峻。因此, 本文从动力边界和活动地块的角度, 侧重于研究南北地震带中北段 $M_s \geq 7.0$ 地震对华北地块 $M_s \geq 6.0$ 地震的影响, 以期对未来华北地块 $M_s \geq 6.0$ 地震的发展地点和趋势判定工作提供借鉴和参考。

1 动力背景分析

大量地震的震源机制解和地应力实测结果表明(邓起东等, 1979; 丁旭初, 张文涛, 1988; 杨树新等, 2012), 我国大陆存在近似于辐射状的区域应力场, 其辐射中心位于青藏断块东部, 自西向东, 从近 N-S 方向逐步顺时针旋转至 NNE-SSW, NE-SW, ENE-WSW 及 NW-SE 方向。在青藏高原地区地壳厚度为 46—56 km, 急剧变化梯度带向东凸出, 凸出地带前方两侧分布有鄂尔多斯盆地和四川盆地。前缘的龙门山一翼出现一系列 ENE 向挤压为主的右旋逆断层, 而六盘山一翼则存在 NW 走向挤压为主的左旋逆断层, 表明青藏地块在此对两翼的挤压和向东的滑动趋势。杨树新等(2012)研究表明, 南北地震带位于中国大陆东西部两个一级地应力场分区的结合部位, 受到印度板块、太平洋板块和菲律宾板块的联合作用。

新构造时期以来, 华北地块的应力场是太平洋板块向欧亚大陆俯冲以及与印度板块碰撞作用下青藏地块向我国东部大陆挤压的联合作用下形成的(邓起东等, 2002), 华北地震的发生也是两大板块运动共同作用于华北地块的结果(朱兆才, 1994)。无论是单次大地震还是利用单台记录的小地震资料所得的华北地块地震震源机制解均较为一致, 即发震应力场的主压应力方向为 ENE-WSW, 发震断层一般均为具有大倾角的走滑断层(吴佳翼等, 1979)。由此也说明, 华北地块不仅受太平洋板块西向俯冲作用的影响, 也是印度板块自西南向东北作用于我国大陆地壳的结果。

地质学和地球物理学的研究结果(嵇少丞等, 2008)也认为, 青藏地块在近 SN 向压缩、抬升和地壳增厚的同时, 也存在着 EW 向的延伸, 并对华北和华南地块产生推挤作用。

华北地台是中国最大的古老克拉通, 位于中亚造山带与秦岭-大别-苏鲁造山带之间, 如图 1 所示。可以看出, 华北地块的东边界为郯庐断裂带, 北边界为西拉木伦断裂。秦岭-大别-苏鲁、松潘-甘孜、祁连和昆仑等造山带的交汇部位及其附近区域, 即南北地震带的中北段、龙门山-六盘山一带是印度板块作用下青藏地块挤压华北地块的典型作用地带。因此该地区强烈地震活动所产生的应力扰动和调整, 必然会对我国东部特别是大华北地块的地震活动产生影响。

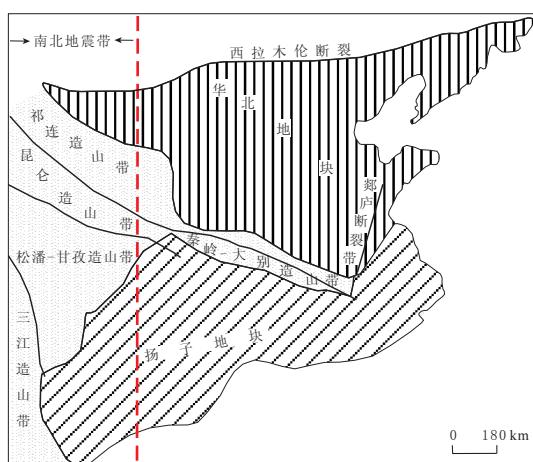


图 1 华北地块和秦岭-大别造山带区域
地质简图(改绘自洪大卫等, 2003)

Fig. 1 The regional geological simplified map of North China block and Qinling-Dabie orogenic belt (revised after Hong *et al.*, 2003)

2 地震活动分析

考虑到地震资料的完整性, 本文所用资料引自 1900 年以来中国地震台网中心的全国 M_s≥6.0 地震目录库。据统计, 1900 年以来我国大陆东部地区(30°N—44°N、104°E—125°E)共发生 M_s≥6.0 地震(不计余震)34 次, 其中南北地震带中北段 M_s≥7.0 地震 9 次(表 1)。大量震源机制解压应力轴所标示的我国现代构造应力场压应力分布方向与利用 GPS 观测得到的我国现今水平地壳运动方向一致性表明(汪素云等, 1996; 周硕愚等, 2001): 我国大陆和海域现代构造应力场与现地壳水平运动具有统一性和确定的方向性; 印度板块向北推挤青藏高原, 以及高原东部被挤出的构造地块往 NE-SE 方向的滑动挤压, 是我国东部海域及其邻区现代构造应力场形成的主要动力(徐杰等, 2012)。因此, 为了更直观地反映印度板块作用下青藏地块对华北地块的挤压作用, 本文以我国东部辐射状应力场的近似中心(35°N、100°E)为动力源点, 如图 2 中三角形所示, 研究华北地块 M_s≥6.0 地震震中与该简化动力源点的距离及其与地震发生时间的关系。该距离由下式确定(张少泉, 1977):

$$\Delta = 111.199 \sqrt{[(\varphi - \varphi_0)^2 + (\lambda - \lambda_0)^2 \cos(\frac{\varphi + \varphi_0}{2})]}, \quad (1)$$

式中: λ 和 φ 为地震震中经度和纬度($\lambda_0 = 100^\circ$, $\varphi_0 = 35^\circ$); Δ 为地震震中与简化动力源点的距离, 单位为 km。

各地震震中到动力源点距离及相关信息见表 1。可以看出, 南北地震带中北段发生 M_s≥7.0 地震后, 华北地块后续随之发生一系列 M_s≥6.0 地震, 且每组首发的 M_s≥6.0 地震距南北地震带中北段最近一次 M_s≥7.0 地震的时间间隔为 1 个月至 11.8 年, 平均为 3.5 年。每组 M_s≥6.0 地震的持续活跃时间基本接近, 依次为 16.1, 14.5, 13.5 和 18.6 年, 期间

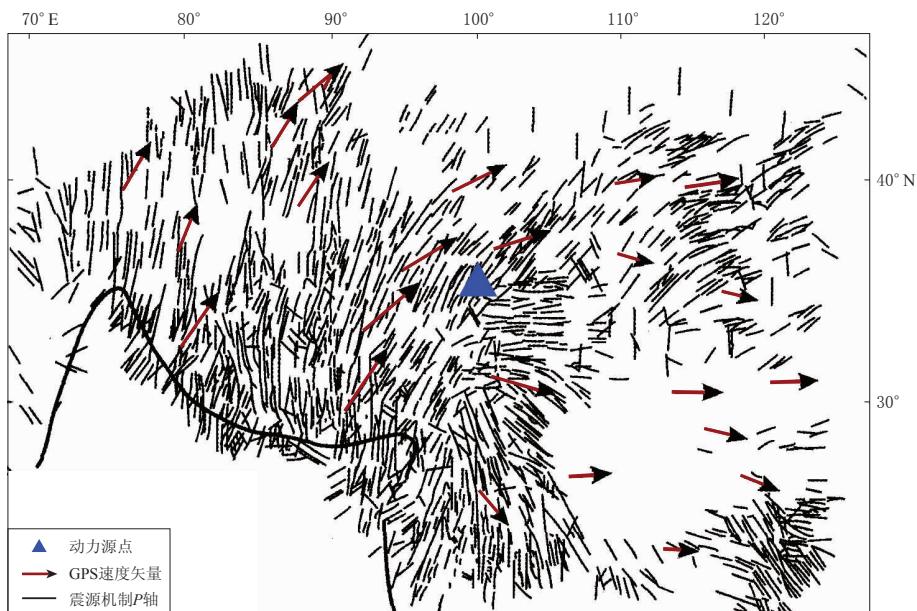


图 2 中国大陆及其邻区震源机制主压应力轴和 GPS 运动模型速度矢量分布图(引自周硕愚等, 2001)

Fig. 2 Distribution of main compression stress of focal mechanism solutions and GPS velocity vectors in Chinese mainland and its adjacent areas (after Zhou et al., 2001)

表 1 1900 年以来我国大陆东部地区 $M_s \geq 6.0$ 地震及其到动力源点距离
 Table 1 $M_s \geq 6.0$ earthquakes in eastern part of Chinese mainland since the year 1900 and their distances to dynamic source point

| 组号 | 序号 | 发震时间 年-月-日 | 北纬/° | 东经/° | M_s | 发震地点 | Δ/km | Δt | $M_s \geq 6.0$ 地震 持续活跃时间 |
|----|------|---------------|------|-------|-------|---------|-------------|------------|-----------------------------|
| | | 1910-01-08 | 35.0 | 122.0 | 6.7 | 山东青岛 | 2214 | | |
| | | 1917-01-24 | 31.3 | 116.2 | 6.2 | 安徽霍山 | 1699 | | |
| | | 1917-05-28 | 39.7 | 124.0 | 6.1 | 辽宁丹东 | 2436 | | |
| ① | * 1 | 1920-12-16 | 36.7 | 104.9 | 8.5 | 宁夏海原 | 526 | | |
| | 2 | 1922-09-29 | 39.2 | 120.5 | 6.5 | 渤海 | 2089 | | |
| | 3 | 1929-01-14 | 40.7 | 111.3 | 6.0 | 内蒙古呼和浩特 | 1284 | | |
| | 4 | 1932-04-06 | 31.4 | 115.0 | 6.0 | 湖北麻城 | 1577 | 1.8 年 | 16.1 年 |
| | 5 | 1940-01-19 | 42.7 | 121.3 | 6.0 | 内蒙古奈曼旗 | 2259 | | |
| | 6 | 1942-07-09 | 43.5 | 121.9 | 6.0 | 内蒙古通辽 | 2342 | | |
| | 7 | 1944-12-19 | 39.7 | 124.3 | 6.8 | 鸭绿江口 | 2465 | | |
| ② | * 8 | 1927-05-23 | 37.7 | 102.2 | 8.0 | 甘肃古浪 | 372 | | |
| | * 9 | 1933-08-25 | 32.0 | 103.7 | 7.5 | 四川叠溪 | 502 | | |
| | 10 | 1934-01-21 | 41.1 | 108.3 | 6.2 | 内蒙古五原 | 1063 | | |
| | 11 | 1937-08-01 | 35.3 | 115.2 | 7.0 | 山东菏泽 | 1529 | 5 个月 | 14.5 年 |
| | 12 | 1945-09-23 | 39.5 | 119.0 | 6.2 | 河北滦县 | 1950 | | |
| | 13 | 1948-05-23 | 37.7 | 121.8 | 6.0 | 山东威海 | 2196 | | |
| | * 14 | 1954-02-11 | 39.0 | 101.5 | 7.3 | 甘肃山丹 | 469 | | |
| ③ | * 15 | 1954-07-31 | 38.8 | 104.2 | 7.0 | 甘肃民乐 | 594 | | |
| | 16 | 1966-03-22 | 37.5 | 115.1 | 7.2 | 河北邢台 | 1533 | | |
| | 17 | 1967-03-27 | 38.5 | 116.5 | 6.3 | 河北河间 | 1688 | | |
| | 18 | 1969-07-18 | 38.2 | 119.4 | 7.4 | 渤海 | 1965 | 11.8 年 | 13.5 年 |
| | 19 | 1975-02-04 | 40.7 | 122.8 | 7.3 | 辽宁海城 | 2340 | | |
| | 20 | 1976-04-06 | 40.2 | 112.1 | 6.2 | 内蒙和林格尔 | 1330 | | |
| | 21 | 1976-07-28 | 39.5 | 118.2 | 7.8 | 河北唐山 | 1874 | | |
| ④ | 22 | 1979-07-09 | 31.5 | 119.3 | 6.0 | 江苏溧阳 | 2001 | | |
| | * 23 | 1976-08-16 | 32.6 | 104.1 | 7.2 | 四川松潘 | 494 | | |
| | * 24 | 1976-08-23 | 32.5 | 104.3 | 7.2 | 四川平武 | 517 | | |
| | 25 | 1976-09-23 | 39.8 | 106.5 | 6.2 | 内蒙古磴口 | 837 | | |
| | 26 | 1979-08-25 | 41.2 | 108.0 | 6.0 | 内蒙古五原 | 1048 | 1 个月 | 18.6 年 |
| | 27 | 1989-10-19 | 39.9 | 113.8 | 6.1 | 山西大同 | 1472 | | |
| | 28 | 1996-05-03 | 40.7 | 109.7 | 6.4 | 内蒙古包头 | 1149 | | |
| ⑤ | 29 | 1998-01-10 | 41.2 | 114.8 | 6.2 | 河北张北 | 1615 | | |
| | * 30 | 2008-05-12 | 31.0 | 103.5 | 8.0 | 四川汶川 | 570 | | |
| | * 31 | 2013-04-20 | 30.3 | 103.0 | 7.0 | 四川芦山 | 606 | 2.2 年 | |

注: * 所示地震为南北地震带中北段 $M_s \geq 7.0$ 地震, Δ 为各地震震中与简化动力源点的距离, Δt 为南北地震带中北段 $M_s \geq 7.0$ 地震与华北地块首发 $M_s \geq 6.0$ 地震的时间间隔。

华北地块发生 $M_s \geq 6.0$ 地震的次数为 4—7 次。

根据表 1 中我国大陆东部地区历次 $M_s \geq 6.0$ 地震的发震时间及震中与动力源点的距离 Δ , 可以得到 1920 年以来南北地震带中北段 $M_s \geq 7.0$ 地震发生后, 华北地块 $M_s \geq 6.0$ 地震的时空演化图像, 如图 3 所示。可以看出, 20 世纪南北地震带中北段 $M_s \geq 7.0$ 地震发生后, 华北地块 $M_s \geq 6.0$ 地震有随时间从南北地震带附近大体向东迁移的规律。从时空进程来看, 大体分为 4 组, 各组地震均以南北地震带中北段 $M_s \geq 7.0$ 地震开始, 后续华北地区陆续发生一系列 $M_s \geq 6.0$ 地震, 且前 3 组中每组地震“序列”的斜率基本相同, 每组地震

“序列”的迁移视速度约为 80 km/a ; 第四组地震“序列”的迁移视速度略有不同, 约为 53.4 km/a 。从图 3 中还可以看出, 1920 年以来, 华北地区有 3 次 $M_s \geq 6.0$ 地震的发生不符合该迁移规律, 依次为 1922 年 9 月 29 日渤海 $M_s 6.5$ 、1976 年 4 月 6 日内蒙古和林格尔 $M_s 6.2$ 和 1996 年 5 月 3 日内蒙古包头 $M_s 6.4$ 地震(图 3 中编号为 2, 20 和 28 的地震)。

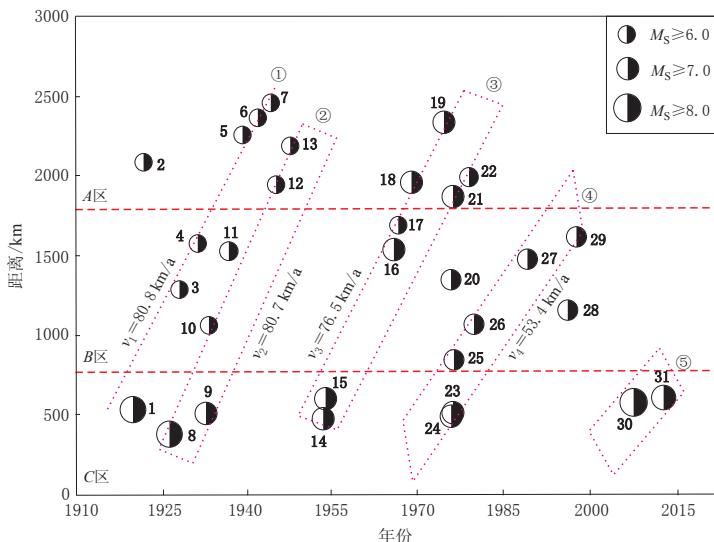


图 3 南北地震带中北段 $M_s \geq 7.0$ 地震与华北地块 $M_s \geq 6.0$ 地震时空演化图

①—⑤分别对应表 1 中的组号; 1—31 分别对应表 1 中的地震序号

A 区: 环渤海地区; B 区: 晋冀蒙地区; C 区: 南北地震带中北段

Fig. 3 The spatio-temporal evolution of $M_s \geq 7.0$ earthquakes in central-northern segment of North-South Seismic Belt and $M_s \geq 6.0$ earthquakes in North China block

①—⑤ correspond to the group number in Table 1; 1—31 correspond to the earthquake number in Table 1.

A zone: Circum-Bohai area; B zone: Shanxi-Hebei-Inner Mongolia region; C zone:

Central-northern segment of North-South Seismic Belt

图 4 给出了表 1 中南北地震带中北段每组 $M_s \geq 7.0$ 地震和后续华北地块 $M_s \geq 6.0$ 地震的空间分布图。可以看出, 南北地震带中北段发生 $M_s \geq 7.0$ 地震后, 后续华北地块 $M_s \geq 6.0$ 地震随着时间的推移, 由西向东迁移。首先在南北地震带北段的内蒙地区附近活动, 接着在晋、冀、蒙及其交界地区, 最后在郯庐断裂带的渤海海峡及其附近区域活动。由此也可以说, 华北地震更多的与印度板块作用下青藏地块向我国大陆东部的挤压作用相关。图 4d 中环渤海地区未发生 $M_s \geq 6.0$ 地震, 该组相对于动力源点的迁移距离最短, 而这组 $M_s \geq 6.0$ 地震的持续活动时间为 4 组中最长的(18.6 年), 因此造成该组的迁移速率相对较慢(图 3)。

结合图 1, 3 和 4 不难发现, 南北地震带中北段发生 $M_s \geq 7.0$ 地震后, 华北地区 $M_s \geq 6.0$ 地震首先在地块内部发生, 接着在地块边界及北部的西拉木伦断裂和东部的郯庐断裂带附近发生, 多数发生在两条断裂的交汇区域(环渤海地区)。图 3 中不符合迁移规律的 3 次例外地震, 分别对应图 4a 中的 2 号地震、图 4c 中的 20 号地震和图 4d 中的 28 号地震。直观地看, 均是发震次序出现了倒置, 即相对南北地震带中北段 $M_s \geq 7.0$ 地震而言, 华北地块 $M_s \geq 6.0$ 地震本应是由西至东、由近及远的发生, 但上述 3 次地震却是在距离动力源点更

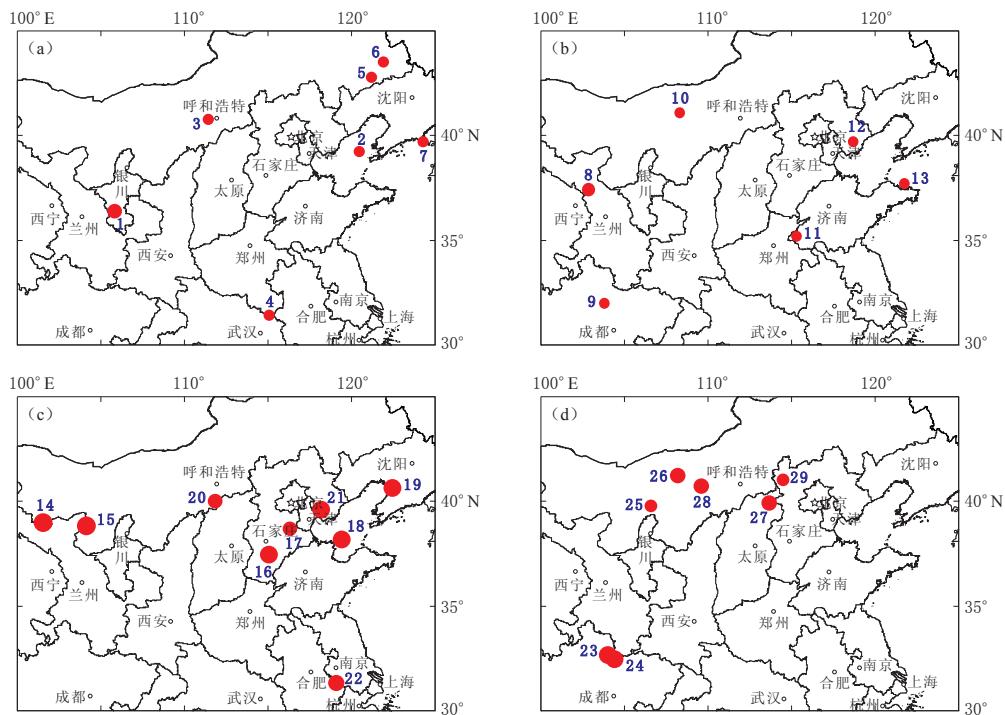


图 4 南北地震带中北段 $M_s \geq 7.0$ 地震和华北地块后续 $M_s \geq 6.0$ 地震空间分布图

1—29 分别对应表 1 中的地震序号; 图(a)–(d)分别对应表 1 中组号①—④

Fig. 4 The spatial distribution of $M_s \geq 7.0$ earthquakes in central-northern segment of North-South Seismic Belt and the subsequent $M_s \geq 6.0$ earthquakes in North China block

1—29 correspond to the earthquake number in Table 1; Figs. (a)–(d) correspond to the group number ①—④ in Table 1

远处的地震发生后, 再次回到距动力源点相对较近的位置发生的。

进一步研究发现, 将图 4 中华北地块 $M_s \geq 6.0$ 地震按每组地震发生的顺序排列, 计算相邻两次地震的经纬度差, 即顺次用后面地震的经纬度减去前面地震的经纬度。若一次地震在前一次地震的北侧发生, 即为北向移步, 此时纬向迁移步长为正; 反之为南向移步, 则纬向步长为负。同样, 若一次地震在前一次地震的东侧发生, 即为东向移步, 此时经向迁移步长为正; 反之为西向移步, 则经向迁移步长为负。图 5 给出了 1920 年以来华北地块每次发生 $M_s \geq 6.0$ 地震相对于前一次 $M_s \geq 6.0$ 地震的经纬向迁移步长。由图 5a 的纬向迁移步长可以看出, 华北地块 $M_s \geq 6.0$ 地震在纬向上南北跳迁明显(即步长值正负变化均有),

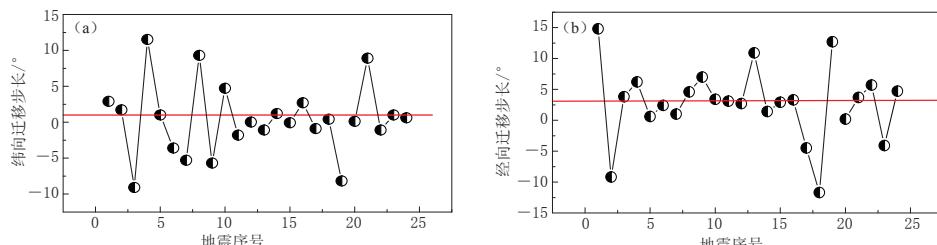


图 5 华北地块 $M_s \geq 6.0$ 地震的纬向(a)和经向(b)迁移步长

Fig. 5 The migration step of the $M_s \geq 6.0$ earthquakes in North China block in latitude direction (a) and in longitude direction (b)

但60%的 $M_s \geq 6.0$ 地震发生在($39^{\circ}\text{N} \pm 1.5^{\circ}$)区域内。而从图5b的经向迁移步长可以看出, 华北地块85%的 $M_s \geq 6.0$ 地震发生在前一次地震的东侧(即步长值为正), 距前一次地震平均为 2.7° 的位置。因此, 从华北地块 $M_s \geq 6.0$ 地震经纬向的迁移来看, 同样也可反映出来自西南方向的印度板块的推挤作用。

3 讨论与结论

板内地震的动态迁移现象反映了板内应力和应变的传递过程。同样, 南北地震带中北段 $M_s \geq 7.0$ 地震后华北地块 $M_s \geq 6.0$ 地震的东向迁移图像, 也反映了印度板块运动作用力向中国大陆的传递过程。曾融生等(1994)根据地震波层析成像研究认为, 印度地壳自南向北向西藏地块的下地壳挤入, 在西藏北部塔里木地区受阻不能继续向北挤入, 而滇青川地区上地幔的塑性大, 从而使西藏地壳由西向东俯冲。沙海军等(2009)研究认为, 中国大陆特大地震的孕育与I级和II级活动地块(张培震等, 2003)的相互作用密切相关, 即当中国大陆发生特大地震后, 将改变其所在活动地块边界带上的应力分布, 进而改变区域构造应力场的分布, 对相关活动地块的地震活动起调整作用。因此可以认为, 南北地震带 $M_s \geq 7.0$ 地震的发生主要是由于印度板块推挤运动的影响。在其作用下, 相邻的华北地块的应力场也随之调整, 进而产生了华北地块 $M_s \geq 6.0$ 地震的系列东向迁移活动。

在分析和讨论地震定向迁移现象的成因时, 首先把迁移现象看作是一种“波”的传播过程(Mogi, 1968; Savage, 1971; Wood, Allen, 1973; Scholz, 1977)。既然短时间内地壳的岩石圈结构不可能发生很大的变化, 因此只要动力源是相对稳定的, 那么其作用传播过程也应该是稳定的(马宗晋等, 1992)。为了检验华北地震的东向迁移主要来自印度板块运动这一结论, 本文尝试改变青藏地块东向作用力代表点的经纬度坐标, 再分别计算华北地块 $M_s \geq 6.0$ 地震震中到动力源点的距离, 并分别绘制各地震震中到动力源点的距离与地震发生时间的关系, 如图6所示。可以看出, 华北地区各组地震“序列”也大体呈现东向迁移规律, 其迁移速率在76 km/a附近波动, 具有一定的稳定性。依据马宗晋等(1992)的观点, 图3和图6中相对稳定的迁移图像说明华北地块所受的力源是稳定的。吴云等(1999)基于

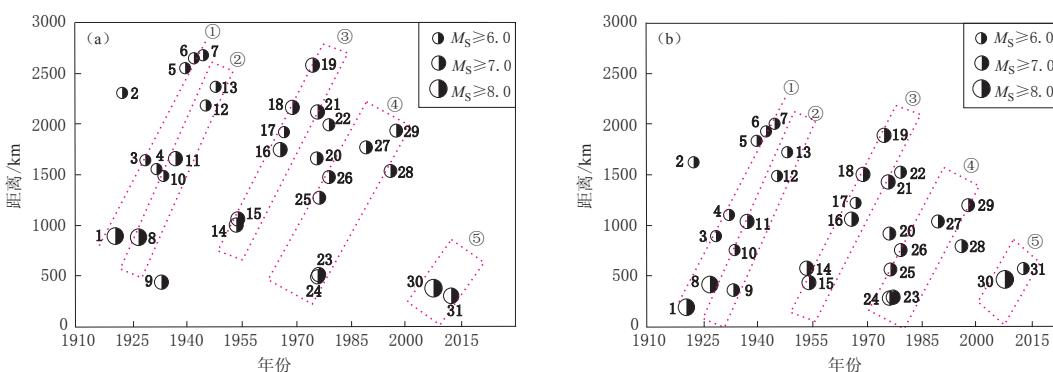


图6 基于不同动力源点的南北地震带中北段 $M_s \geq 7.0$ 地震与华北地块 $M_s \geq 6.0$ 地震时空演化图

(a) 动力源点($30^{\circ}\text{N}, 100^{\circ}\text{E}$); (b) 动力源点($35^{\circ}\text{N}, 105^{\circ}\text{E}$)

Fig. 6 The spatio-temporal evolution of $M_s \geq 7.0$ earthquakes in central-northern segment of North-South Seismic Belt and $M_s \geq 6.0$ earthquakes in North China block based on different power points
(a) Dynamic source point ($30^{\circ}\text{N}, 100^{\circ}\text{E}$); (b) Dynamic source point ($35^{\circ}\text{N}, 105^{\circ}\text{E}$)

国家攀登计划建立的全国 GPS 网 21 个测点的复测结果, 分析认为印度板块、太平洋板块和菲律宾板块共同控制着中国大陆的现今地壳运动和形变, 但印度板块似乎起主导作用。GPS 资料的数值模拟结果显示: 三者对中国大陆驱动的边界作用强度之比约为 4:1.25:1 (肖兰喜等, 2003; 肖兰喜, 2009); 南北地震带在中国大陆的现今地壳运动和形变过程中起重要调节作用, 沿 35°N 线似乎存在一个调节带; 三大板块对我国大陆的动力作用是动态稳定的, 直观表现为推挤速度的稳定。对比图 3 与图 6, 发现图 3 中地震“序列”的东向近乎匀速的迁移规律似乎更清晰, 说明将中国东部应力场的辐射中心点(35°N、100°E)作为简化的动力源点具有一定的区域代表性。这一结果在一定程度上与上述观点互为佐证。

至于图 3 中出现的不符合“序列”迁移规律的 3 次例外地震, 作者也作了大量的分析研究。由于华北地块受动力环境控制的同时又受局部和阶段性孕震环境的影响, 其应力和应变场既体现出整体的一致性(东向平移), 又显示出动态的阶段性变化特征(陈鳌, 2011)。其中值得一提的是, 张跃刚和胡新康(2005)通过 GPS 资料研究认为, 华北地块大体有向东平移的趋势, 但 1995—1996 年华北地块边界的相对运动较为突出, 鄂尔多斯地块与其它地块间的运动呈现明显的分离, 由最初的向东运动逐渐转为向西运动, 由此认为向东平移是华北地块水平运动的背景场, 某些地块在某些时段出现的背离运动是区域构造运动的暂时调整, 可能与区域孕震过程有关。这或许在某种程度上可以解释 1996 年 5 月 3 日包头 $M_s 6.4$ 地震的“西向迁移”, 当然这可能只是一种可能, 其具体原因有待进一步深入研究。至于 1922 年渤海 $M_s 6.5$ 地震和 1976 年和林格尔 $M_s 6.2$ 地震, 由于暂时未收集到 GPS 等相关资料, 在此不便妄加评述。

综上, 众多的研究结果表明, 南北地震带强震对华北地块的应力场和形变场均具有一定的影响(嵇少丞等, 2008), 但这种影响不一定以触发地震的方式呈现, 也可能以其它方式释放能量。换言之, 南北地震带强震对华北地块地震的发生有影响, 但不是充分必要条件。马宗晋等(1992)研究认为, 地震的定向迁移活动存在“快”、“慢”两种过程, 即这种迁移是“慢”过程在定向动力附加作用的影响下, 产生的群体优势定向的现象, 很难用一次或多次动力作用过程的复杂变化加以解释。因此上述出现的个别不符合常规的“迁移”图像也正说明了地震迁移的复杂性。其实, 华北地块 $M_s \geq 6.0$ 地震也并不一定全是南北地震带强震的影响, 太平洋板块的俯冲作用也是其中影响因素之一(吴佳翼等, 1979; 孙文斌等, 1985)。

上述的地震迁移图像只能说明在一定时间段内(1900 年以来), 印度板块对华北地区的作用力更强, 因为强震的孕育过程需要几十年—几百年的时间尺度。陈宇卫等(2003)研究结果表明, 印度板块的北向推挤作用力使中国大陆西侧地块有明显向东的运动趋势。在其影响下, 大华北 $M_s \geq 6.0$ 地震与西部 $M_s \geq 7.5$ 特大地震具有同步活动的特点, 但滞后于西部地震活动时间约 15 年左右。本文研究结果也表明, 华北地块 $M_s \geq 6.0$ 地震主要受控于印度板块作用下青藏地块向中国大陆东部挤压的影响, 在其作用下, 南北地震带中北段发生 $M_s \geq 7.0$ 地震后, 华北地块 $M_s \geq 6.0$ 地震将发生一系列的东向迁移, 空间上 60% 的 $M_s \geq 6.0$ 地震的发震地点在(39°N±1.5°)区域内。根据以往各组地震所得的迁移视速度平均约为 80 km/a, 华北地块首发 $M_s \geq 6.0$ 地震距南北地震带中北段最近一次 $M_s \geq 7.0$ 地震的时间间隔约为 1 个月至 11.8 年, 平均为 3.5 年。但实际表 1 中第一、二、四组“序列”中, 华北地块首发 $M_s \geq 6.0$ 地震距南北地震带中北段最近一次 $M_s \geq 7.0$ 地震的时间间隔

隔均不超过2年。众所周知,南北地震带中北段近年开始了新一组的 $M_s \geq 7.0$ 地震活动,先后发生了2008年汶川 $M_s 8.0$ 和2013年芦山 $M_s 7.0$ 地震,且芦山 $M_s 7.0$ 地震的发生距今已有2.2年。因此根据本文的研究结果,未来1—3年内华北地块存在发生 $M_s \geq 6.0$ 地震的可能,晋冀蒙交界和环渤海及其附近地区值得重点关注。

参 考 文 献

- 陈鳌. 2011. 同忻煤矿地质动力环境分析与矿压显现规律研究[D]. 阜新: 辽宁工程技术大学; 23.
- Chen Y. 2011. *Research on Geo-dynamic Environment and Strata-Pressure Behavior of Tongxin Mine* [D]. Fuxin: Liaoning Technical University; 23 (in Chinese).
- 陈宇卫, 张军, 同素萍, 庆梅. 2003. 西部地区特大地震活动特征及其对大华北地震趋势的影响[J]. 地震地质, 25(4): 647-654.
- Chen Y W, Zhang J, Yan S P, Qing M. 2003. Characteristics of great earthquake activity in West China and its influence on seismic tendency in North China[J]. *Seismology and Geology*, 25(4): 647-654 (in Chinese).
- 邓起东, 张裕明, 许桂林, 范福田. 1979. 中国构造应力场特征及其与板块运动的关系[J]. 地震地质, 1(1): 11-22.
- Deng Q D, Zhang Y M, Xu G L, Fan F T. 1979. On the tectonic stress field in China and its relation to plate movement [J]. *Seismology and Geology*, 1(1): 11-22 (in Chinese).
- 邓起东, 张培震, 冉勇康, 杨晓平, 闵伟, 楚全芝. 2002. 中国活动构造基本特征[J]. 中国科学:D辑, 32(12): 1020-1032.
- Deng Q D, Zhang P Z, Ran Y K, Yang X P, Min W, Chu Q Z. 2002. The basic characteristics of active tectonic in Chinese mainland[J]. *Science in China: Series D*, 32(12): 1020-1032 (in Chinese).
- 丁旭初, 张文涛. 1988. 中国大陆东部现今构造应力状态[J]. 地震学报, 10(1): 25-38.
- Ding X C, Zhang W T. 1988. State of modern tectonic stress field in East China mainland[J]. *Acta Seismologica Sinica*, 10(1): 25-38 (in Chinese).
- 洪大卫, 王涛, 童英, 王晓霞. 2003. 华北地台和秦岭-大别-苏鲁造山带的中生代花岗岩与深部地球动力学过程[J]. 地学前缘, 10(3): 231-256.
- Hong D W, Wang T, Tong Y, Wang X X. 2003. Mesozoic granitoids from North China block and Qinling-Dabie-Sulu orogenic belt and their deep dynamic process[J]. *Earth Science Frontiers*, 10(3): 231-256 (in Chinese).
- 嵇少丞, 王茜, 孙圣思, 许志琴, 李海兵. 2008. 亚洲大陆逃逸构造与现今中国地震活动[J]. 地质学报, 82(12): 1644-1667.
- Ji S C, Wang Q, Sun S S, Xu Z Q, Li H B. 2008. Continental extrusion and seismicity in China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 82(12): 1644-1667 (in Chinese).
- 马宗晋, 李献智, 金继宇. 1992. 地震迁移的规律、解释和预报: 中国大陆四条地震带的地震迁移[J]. 地震地质, 14(2): 129-139.
- Ma Z J, Li X Z, Jin J Y. 1992. The law interpretation and prediction of earthquake migration: Earthquake migration of four seismic belts in China mainland[J]. *Seismology and Geology*, 14(2): 129-139 (in Chinese).
- 毛可, 石特临, 杨立明. 1997. 南北地震带强震迁移特征及其预测意义[J]. 西北地震学报, 19(4): 6-11.
- Mao K, Shi T L, Yang L M. 1997. The migratory character of strong earthquakes in the North-South seismic belt and its significance for prediction[J]. *Northwestern Seismological Journal*, 19(4): 6-11 (in Chinese).
- 沙海军, 刘耀炜, 刘冬英. 2009. 中国大陆特大地震的地震调整作用初步研究[J]. 中国地震, 25(2): 193-198.
- Sha H J, Liu Y W, Liu D Y. 2009. Preliminary study on adjusting effect of great earthquake in Chinese mainland[J]. *Earthquake Research in China*, 25(2): 193-198 (in Chinese).
- 孙文斌, 和跃时, 李英波. 1985. 日本海区板块俯冲与华北地震[J]. 地震学报, 7(1): 33-43.
- Sun W B, He Y S, Li Y B. 1985. Subduction of the Pacific Plate in the Sea of Japan and earthquakes of northeastern China[J]. *Acta Seismologica Sinica*, 7(1): 33-43 (in Chinese).
- 汪素云, 许忠淮, 俞言祥, 张琳, 1996. 中国及其邻区周围板块作用力的研究[J]. 地球物理学报, 39(6): 764-771.
- Wang S Y, Xu Z H, Yu Y X, Zhang L. 1996. Inversion for the plate driving forces acting at the boundaries of China and

- its surroundings[J]. *Acta Geophysica Sinica*, **39**(6): 764–771 (in Chinese).
- 吴佳翼, 郁曙君, 何淑韵. 1979. 华北地震同日本地震的相关性[J]. 地球物理学报, **22**(4): 415–438.
- Wu J Y, Yu S J, He S Y. 1979. The correlation of earthquake occurrence between northeastern China and Japan[J]. *Acta Geophysica Sinica*, **22**(4): 415–438 (in Chinese).
- 吴云, 帅平, 周硕愚, 秦小军, 施顺英, 邓于金. 1999. 用 GPS 观测结果对中国大陆及邻区现今地壳运动和形变的初步探讨[J]. 地震学报, **21**(5): 545–553.
- Wu Y, Shuai P, Zhou S Y, Qin X J, Shi S Y, Deng Y J. 1999. Current crustal motion and deformation in the Chinese mainland and its surrounding area determined from GPS data[J]. *Acta Seismologica Sinica*, **12**(5): 596–606.
- 肖兰喜, 朱元清, 陶九庆, 杜宪宋. 2003. 岩石圈流变强度与中国大陆构造运动关系的探讨[J]. 西北地震学报, **25**(4): 304–311.
- Xiao L X, Zhu Y Q, Tao J Q, Du X S. 2003. Study on relation between the viscosity coefficients of lithosphere and tectonics movement in China[J]. *Northwestern Seismological Journal*, **25**(4): 304–311 (in Chinese).
- 肖兰喜. 2009. 华北地区与青藏高原地区强震孕育过程相关性的动力学解释[J]. 国际地震动态, (4): 73.
- Xiao L X. 2009. The analysis of geodynamic process about strong earthquake activity period in Tibet Plateau area and in North China area[J]. *Recent Developments in World Seismology*, (4): 73 (in Chinese).
- 徐杰, 周本刚, 计凤桔, 周庆, 高祥林, 吕悦军, 陈国光. 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, **19**(4): 1–7.
- Xu J, Zhou B G, Ji F J, Zhou Q, Gao X L, Lü Y J, Chen G G. 2012. The studies on the recent tectonic stress field about the offshore of China mainland and adjacent areas[J]. *Earth Science Frontiers*, **19**(4): 1–7 (in Chinese).
- 杨树新, 姚瑞, 崔效锋, 陈群策, 黄禄渊. 2012. 中国大陆与各活动地块、南北地震带实测应力特征分析[J]. 地球物理学报, **55**(12): 4207–4217.
- Yang S X, Yao R, Cui X F, Chen Q C, Huang L Y. 2012. Analysis of the characteristics of measured stress in Chinese mainland and its active blocks and North-South seismic belt[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **55**(12): 4207–4217 (in Chinese).
- 曾融生, 丁志峰, 吴庆举. 1994. 青藏高原岩石圈构造及动力学过程研究[J]. 地球物理学报, **37**(1): 99–116.
- Zeng R S, Ding Z F, Wu Q J. 1994. A review on the lithospheric structures in Tibetan Plateau and constraints for dynamics[J]. *Acta Geophysica Sinica*, **37**(1): 99–116 (in Chinese).
- 张培震, 邓起东, 张国民, 马瑾, 甘卫军, 闵伟, 毛凤英, 王琪. 2003. 中国大陆的强震活动与活动地块[J]. 中国科学: D 辑, **33**(增刊): 12–20.
- Zhang P Z, Deng Q D, Zhang G M, Ma J, Gan W J, Min W, Mao F Y, Wang Q. 2003. The strong earthquake activity and active blocks in China mainland[J]. *Science in China: Series D*, **33**(Suppl): 12–20 (in Chinese).
- 张少泉. 1977. 近震分析[M]. 北京: 地震出版社: 163–178.
- Zhang S Q. 1977. *Near Earthquake Analysis*[M]. Beijing: Seismological Press: 163–178 (in Chinese).
- 张跃刚, 胡新康. 2005. 华北地区块体及其边界的相对运动[J]. 大地测量与地球动力学, **25**(1): 47–50.
- Zhang Y G, Hu X K. 2005. Relative motion between plates and their boundaries in North China[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, **25**(1): 47–50 (in Chinese).
- 周硕愚, 吴云, 施顺英, 杨福平. 2001. 中国大陆东南边缘海现时地壳运动与地震动力学综合研究[J]. 地壳形变与地震, **21**(1): 1–14.
- Zhou S Y, Wu Y, Shi S Y, Yang F P. 2001. Integrated research on current crustal movement and earthquake dynamics in marginal sea southeast of China Continent[J]. *Crustal Deformation and Earthquake*, **21**(1): 1–14 (in Chinese).
- 朱兆才. 1994. 华北地区地震活动及其与印度板块运动的关系[J]. 华北地震科学, **12**(1): 35–42.
- Zhu Z C. 1994. The seismic activity in North China and its relation to the motion of Indian Plate[J]. *North China Earthquake Sciences*, **12**(1): 35–42 (in Chinese).
- Mogi K. 1968. Migration of seismic activity[J]. *Bull Earthq Res Inst, Tokyo Univ*, **46**(1): 53–74.
- Savage J C. 1971. A theory of creep waves propagating along a transform fault[J]. *J Geophys Res*, **76**(8): 1954–1966.
- Scholz C H. 1977. A physical interpretation of the Haicheng earthquake prediction[J]. *Nature*, **267**(5607): 121–124.
- Wood M D, Allen S S. 1973. Recurrence of seismic migrations along the central California segment of the San Andreas fault system[J]. *Nature*, **244**(5413): 213–215.