第 26 卷第 1 期
2020 年 2 月

地 质 力 学 学 报
JOURNAL OF GEOMECHANICS

Vol. 26 No. 1
Feb. 2020

DOI：10.12090/j.issn.1006-6616.2020.26.01.002

文章编号：1006-6616（2020）01-0013-20

地震迁移的类型、特征及机制讨论

赵根模[1,2]，吴中海[1,3]，刘　杰[1,4]

ZHAO Genmo[1,2], WU Zhonghai[1,3], LIU Jie[1,4]

1. 中国地质科学院地质力学研究所，北京 100081；
2. 天津市地震局，天津 300201；
3. 活动构造与地壳稳定性评价重点实验室，北京 100081；
4. 国家测绘地理信息局地图技术审查中心，北京 100830

1. *Institute of Geomechanics*, *Chinese Academy of Geological Sciences*, *Beijing* 100081, *China*;
2. *Earthquake Administration of Tianjin Municipality*, *Tianjin* 300201, *China*;
3. *Key Laboratory of Active Tectonics and Crustal Stability Assessment*, *Beijing* 100081, *China*;
4. *Mapping Technical Review Center*, *National Administration of Surveying*, *Mapping and Geoinformation*, *Beijing* 100830, *China*

ZHAO G M, WU Z H, LIU J, 2020. The types, characteristics and mechanism of seismic migration [J]. Journal of Geomechanics, 26 (1): 13-32 DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2020.26.01.002

Abstract: The migration of seismicity refers to the sequential occurrence of earthquakes in a certain direction, which is the ordered structure in the local area in the overall disorder of seismicity. Through the systematic analysis of the typical seismic migration phenomena in the region, it can be found that the migrations can be divided into three categories: longitudinal migration along the fault strike, transverse migration along the vertical fault strike and deep source migration on the lithosphere scale. Combined with the analysis of specific examples, the main characteristics of vertical migration (including one-way, two-way, repeated and jumping migration), horizontal migration and deep source earthquake migration can be preliminarily summarized, and the velocity values of different types of migrations can be preliminarily estimated, among which the average velocity of vertical migration along the global plate boundary is about 569 km/a, the average velocity along the sub plate boundary is about 120 km/a, and the average velocity along the continental internal fault zone is about 34 km/a. The horizontal migration is relatively complex. It is found that there are two kinds of migration phenomena in East Asia, one is about 20 km/a, the other is about 50 km/a. The global average migration velocity of deep source earthquakes is about 360 km/a. There are different levels and grades of vertical and horizontal migration of earthquakes, and there are also many kinds of deformation waves and migration phenomena with different frequencies, energy and velocities, which may be the result of the interaction of interruption layers in the process of large earthquake clustering activity, the triggering of seismic stress and the propagation of deformation waves on the scale of lithosphere, and it is obvious that the existence and regularity of this kind of earthquake migration phenomenon on the scale of large space can provide new ideas and method reference for regional seismic risk analysis.

Key words: tectonic system, seismic migration, stress triggering, strain wave, seismic hazard analysis

摘　要：地震活动的迁移是指地震沿着某一方向循序地发生，是地震活动总体无序中局部出现的有序结构。通过系统分析区域上典型的地震迁移现象可以发现，迁移可划分为沿断裂走向的纵向迁移、垂直断裂

基金项目：中国地质调查局地质调查项目（12120114002101，DD20160268）；国家自然科学基金项目（41571013，41171009）

第一作者简介：赵根模（1937-），男，研究员，从事地震地质与地震活动性研究。E-mail：mingzhao_tj@Hotmail.com

通讯作者：吴中海（1974-），男，博士，研究员，主要从事新构造与活动构造研究。E-mail：wzhh4488@sina.com

收稿日期：2019-06-11；**修回日期**：2019-11-18；**责任编辑**：范二平

引用格式：赵根模，吴中海，刘杰，2020. 地震迁移的类型、特征及机制讨论［J］. 地质力学学报，26（1）：13-32　DOI：10.12090/j.issn.1006-6616.2020.26.01.002

走向的横向迁移与岩石圈尺度的深源迁移三大类。结合具体的实例分析，可初步归纳出纵向迁移（包括单向、双向、反复和跳跃式迁移等常见形式）、横向迁移和深源地震迁移的主要特征，并初步估算出了不同类型迁移的速度值，其中沿全球板块边界纵向迁移平均速度约为 $\overline{V}=569$ km/a，沿亚板块边界的平均速度约为 $\overline{V}=120$ km/a，沿大陆内部断裂带平均速度约为 $\overline{V}=50$ km/a。横向迁移相对比较复杂，初步发现在东亚存在两种速度分别为约 20 km/a、50 km/a 的迁移现象。而深源地震迁移速度的全球平均值大约为 360 km/a。地震的纵向与横向迁移都存在不同层次和级别，也存在多种不同频率、能量与速度的形变波与迁移现象，这很可能是区域上大地震丛集活动过程中断层相互作用、地震应力触发和岩石圈尺度的形变波传播等因素共同作用的结果，而这种大空间尺度上的地震迁移现象的存在及其所具有的规律性特征，显然可为开展区域地震危险性分析提供新的思路和方法参考。

关键词：构造体系；地震迁移；应力触发；形变波；地震危险性分析

中图分类号：P315　　**文献标识码**：A

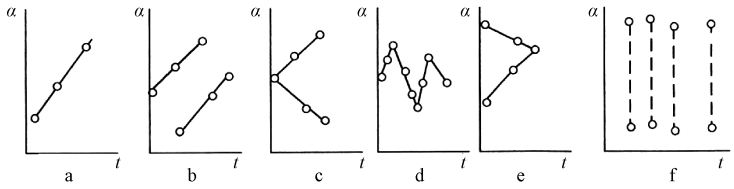
0　引言

地震迁移是地震活动迁移的简称，是指地震沿着某一方向稳定循序地发生，是地震群体活动图像的一种，是一种形象化称谓。当活动地块或地震带中同时存在多个应力高度集中的强固点（凹凸点）共同承受构造应力作用时，在应力集中释放期由于地震远程应力波触发便会逐个破裂，形成一种地震活动“接力赛跑”图像，导致区域上出现地震丛集活动现象，这实际上属于一种典型的不同构造体系间或同一构造体系内部断层间相互作用以及地震动态与静态应力触发效应的表现形式（吴中海等，2014）。地震应力触发中存在的应力传递与大地震快速破裂引起的地震弹性波传播和地震永久变形或位错产生的弹塑性形变波低速传播等都有着直接关联（Mogi，1968；李善邦，1981；見野和夫，1988；赵根模等，2005）。认识地震应力触发引起的地震迁移现象研究有助于更好地理解岩石圈变形方式与地震活动，有重要理论和实际意义（吴中海等，2014）。由于地震迁移总是与活动构造体系有密切关联，因此备受地震地质学者的重视，在地震科学初创时期就已受到关注与确认（Richter，1958；Mogi，1968；李善邦，1981）。早期研究主要研究地震沿板块边界和断裂带走向的迁移。而笔者发现并指出，地震也存在沿板块边界和断裂带走向法线方向迁移的事实，遂将前者称为顺走向迁移，简称纵向迁移，后者称为顺走向法线迁移，简称横向迁移。文章将分别介绍地震纵向迁移、横向迁移和深源地震迁移，以及与迁移相关的问题。

从本质上说，地震迁移应属“地震自组织性”的一种表现形式，是总体无序性中局部出现的有序性现象，这对更好地认识地震活动习性，并服务于防震减灾都有重要参考意义。文章涉及的全球地震活动资料来源主要是 2011 年版《全球地震目录 $M\geqslant 5.0$》（宋治平，2011），该目录整理汇编了 ISC、USGS、CSN、NEIC、NOAA、GSHAP、CGS、ENGDAHL 等十余种重要的全球及国家地震目录。在地震信息完整性方面，编者采用分段频度统计法分析了目录的完整性，表明 1669 年以前的 7 级以下地震存在较严重缺失，而 1700—1930 年的 7 级以上地震信息基本完整，1931—1956 年 6.5 级以上地震基本完整，1969—1999 年的 5.5 级以上地震基本完整。2000 年以后的 5 级以上地震完整（Richter，1958；Soloviev，1974；Usami，1979；顾功叙，1983；谢毓寿和蔡美彪，1983；时振梁，1986；見野和夫，1988；中国地震局震害防御司，1995，1999；Engdahl and Villasenor，2002；宋治平等，2011）。因此，该地震目录的完整性与震级和年代成正比，另外也与历史文化发展的差异及历史地震研究程度有关，例如中国、日本、俄罗斯、希腊、意大利、南美等国家的历史地震完整性高于全球平均值。依据这些特点，文章主要采用 8 级或 7 级以上资料，只有少量采用 6~7 级地震资料，没有采用任何 6 级以下地震资料，这样可保证分析资料的完整性与可靠性。

1　地震的纵向迁移

纵向迁移可分为单向、双向、重复、往返、跳迁等多种形式。按照规模由大到小可分为全球板块边界，亚板块边界和内陆性断层三个层级（图 1）。



a—单向；b—定向重复；c—双向；d—往返；e—相向汇聚；f—跳迁

图 1　纵向地震迁移的类型图（纵座标为断裂或地震带走向，横坐标为时间）

Fig. 1　The type maps of the longitudinal seismic migration (the longitudinal coordinate indicates fault or seismic belt direction, the abscissa indicates time)

1.1　全球板块边界的纵向迁移

世界上规模最大的地震纵向迁移发生在全球板块边界。

1.1.1　单向迁移实例

1952—1964 年北太平洋俯冲带（$M \geqslant 9$），由堪察加向东（阿拉斯加），历时 12 年，迁移速度 $V = 450$ km/a（图 2a）；1918—1923 年西太平洋俯冲边界（$M \geqslant 7.9$），历时 20 年，$V = 275$ km/a（图 3a）；1939—1960 年南美海沟（$M \geqslant 8$），由秘鲁向南（智利）历时 21 年，最终触发了世界最大地震，迁移速度 $V = 143$ km/a（图 3b）；1939—1975 年欧非板块边界地中海带（$M \geqslant 7.5$）（图 2b），历

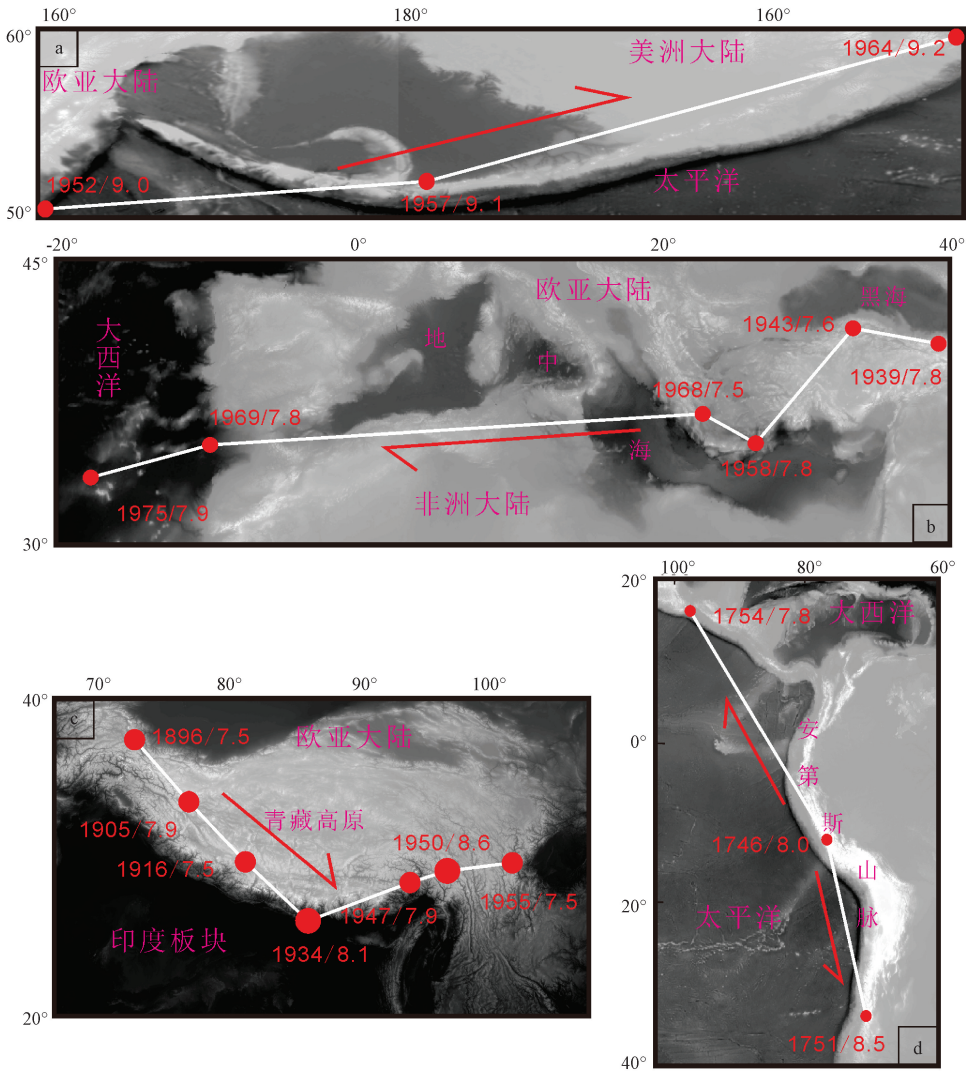


图 2　板块边界地震迁移

Fig. 2　Seismic migration on plate boundary

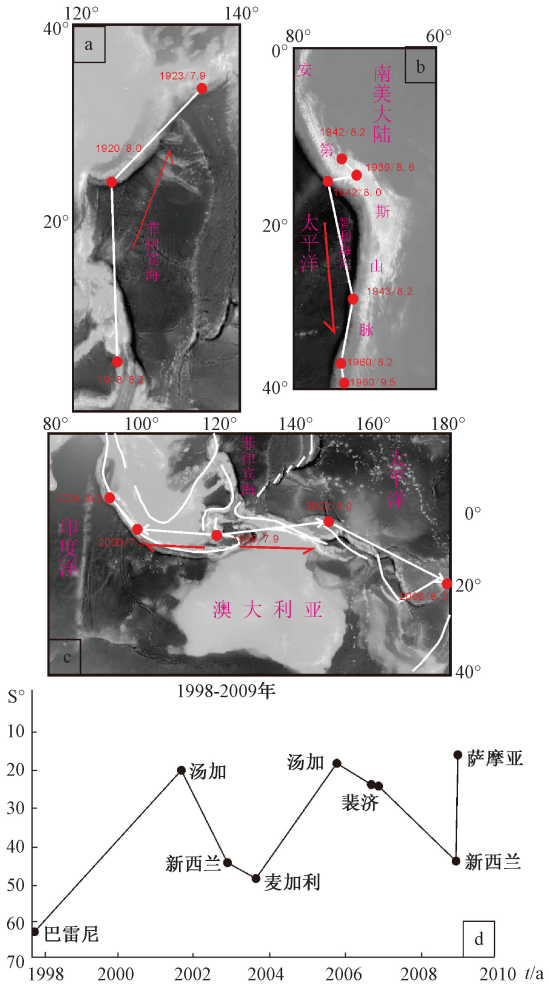


图 3　板块边界地震迁移

Fig. 3　Seismic migration on plate boundary

时 36 年，V=158 km/a；1896—1955 年喜马拉雅带（$M\geqslant 7.5$）（图 2c），该带是印度板块与欧亚板块会聚边界，从西构造结开始到东构造结终止（Scholz，1977；马宗晋等，1992；汪一鹏等，2007），历时 60 年，V=34 km/a。

1.1.2　双向迁移

1746—1754 年南美海沟（$M\geqslant 7.8$），同时向南北相反方向迁移（图 2d），历时 5 年，V_1=320 km/a，V_2=370 km/a；1996—2006 年西南太平洋海沟迁移，历时 10 年，西向 V_1=280 km/a，东向 V_2=640 km/a（图 3c）。

1.1.3　往复迁移

1998—2009 年澳大利亚板块东边界，历时 11 年，V_1=644 km/a，V_2=61 km/a，V_3=195 km/a（图 3d）。

1.2　板块-陆内复合式迁移及亚板块边界迁移

1.2.1　兴都库什-贝加尔湖亚板块边界（1905—1957 年）

该带是欧洲与亚洲两个亚板块分界线，也是新疆—西藏三角形亚板块西边界。1905—1945 年（$M\geqslant 7.8$），历时 40 年，V=7 km/a；1907—1957 年（$M\geqslant 7.9$），历时 50 年，V=6 km/a，该带对新疆地震影响巨大（图 4a）。

1.2.2　苏门答腊—缅甸弧—南北带复合式地震迁移（1935—1957 年）

这是大板块边界与小板块边界复合式迁移。

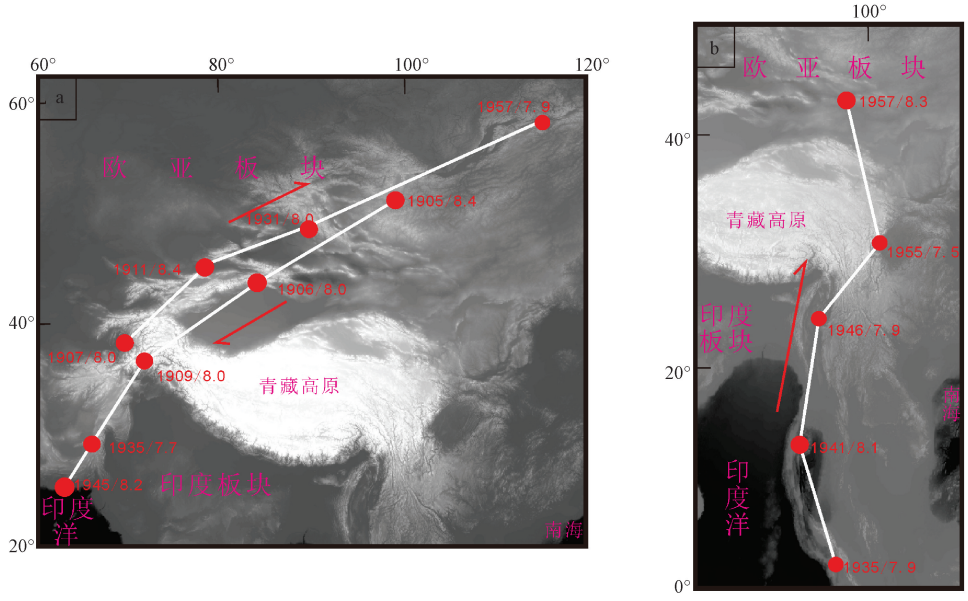


图 4　复合式迁移

Fig. 4　Combined-type migration

该带是不同的、多重的反 S 型构造组合的帚状构造体系，是新生代尤其是第四纪随着东喜马拉雅构造结的发展成长，其楔体北端前方出现南北向高应力分布带，并形成地震带，与前新生代构造很不协调，而是“迁就”了老构造。1935—1957 年迁移序列最早由著名地震学家 Mogi（1968 年）提出（$M \geqslant 7.5$），历时 22 年，南段苏门答腊—缅甸 $V = 23.2$ km/a，北段缅甸—蒙古 $V = 21$ km/a（图 4b）（吴中海等，2016）。

1.2.3　沿新疆地块与西藏地块边界近东西向的单向地震迁移（1956—2008 年）（$M \geqslant 7.5$）

地震沿东西向昆仑带迁移，这是新疆三角与西藏梯形地块的边界，历时 52 年，$V = 70$ km/a。应该指出在 20 世纪上半叶（1902—1964 年）全球最主要地震带几乎同步发生大规模迁移，而且中国西部大三角三边也同步发生迁移（赵根模等，2019），这些迁移中的巨大地震也都造成巨大破坏和损失。这是很值得注意的地震现象（图 4）。

1.3　沿陆内断裂的小规模迁移

沿陆内断裂的小规模迁移指大陆内部局部地震带或断裂带的地震迁移，举例说明：祁连山带（1920—1932 年）（$M \geqslant 7.5$），地震从南北带开始沿北西向祁连山构造带迁移，历时 12 年，$V = 83$ km/a（图 5a）。山西带（山西地堑构造带）迁移（1618—1695 年）（$M \geqslant 7$），从北向南，从广灵—灵丘—原平—洪洞，历时 77 年，$V = 60$ km/a（图 5b）。河北平原带和郯庐带双线平行同步迁移（1966—1976 年），从南往北，从邢台—河间—唐山、从渤海—海城（图 5c），双线平行并进，这种形式很罕见，历时 10 年，$V = 40$ km/a。西藏西部扎夏雪山带（1944—1961 年）（$M \geqslant 6.5$），从昂拉仁错—查罗尔错，历时 17 年，$V = 18$ km/a，从地震迁移可推测在该地存在北西向断裂（图 5d）。从以上几个实例可见，陆内沿断裂纵向迁移速度在 18~83 km/a 范围，并显示出震级越大，迁移速度越快且空间跨度越大的特点。

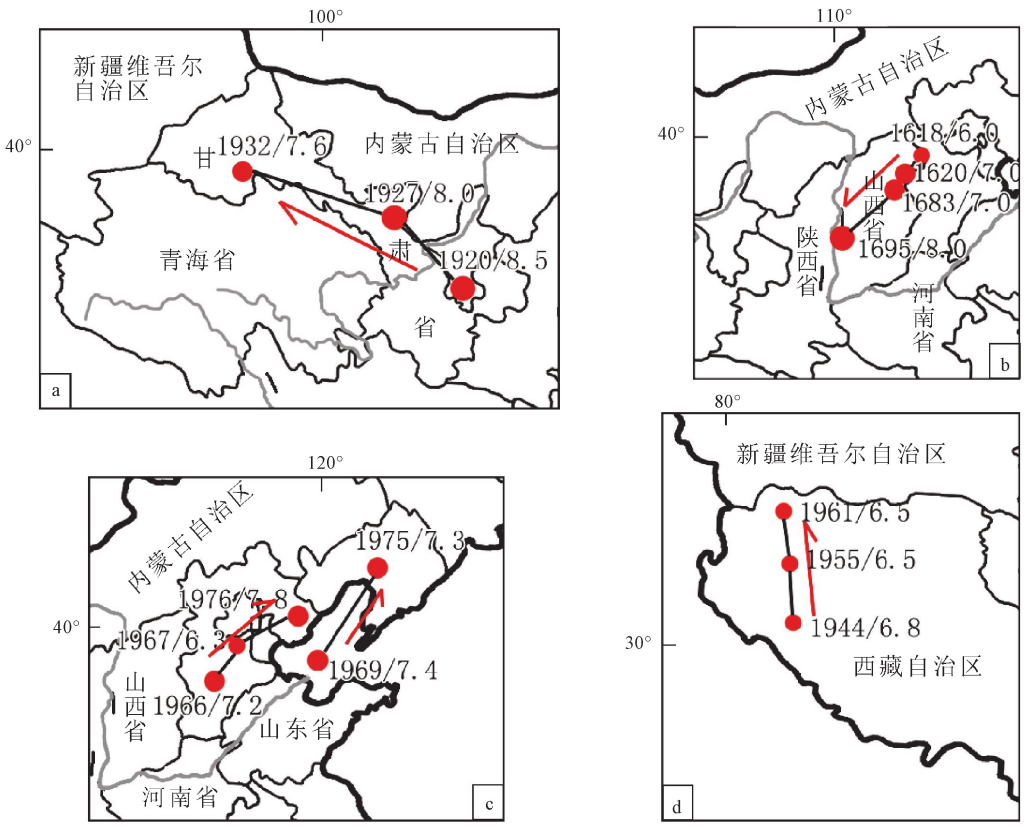


图 5　陆内地震迁移

Fig. 5　Intracontinental seismic migration

由上可见，最高层级的大板块边界迁移速度分布在 75~1950 km/a，平均 $V = 569$ km/a，快慢依次为西南太平洋海沟（1024 km/a）、北太平洋海沟（450 km/a）、南美海沟（277 km/a）、西太平

洋海沟（275 km/a），欧非板块边界（203 km/a），喜马拉雅带（75 km/a）。第二层级亚板块边界为70~230 km/a，平均120 km/a；第三层级内陆迁移速度平均为约50 km/a。

1.4 地震跳迁图象

讨论地震迁移时还应注意一种特殊活动图像，俗称“两头跳”或远程“呼应”，在同一地震带、断裂带或构造块体的两端在数月至几年不等的较短时间内集中发生大震，并且时间相关性特别明显。

在中国大陆1966—1976年华北与西南地震高潮活动几乎同时开始、同时结束，引起地学界的高度关注，该现象十分罕见，地震学界称为“跳迁”、“呼应”、“对应”。这是过去从未见过报道的特殊现象，因而令人印象深刻。

华北与川滇相距遥远，分属不同构造区，中间隔着鄂尔多斯地块、江南古陆和秦岭构造带，但在“一定时期内地震遥相呼应现象”明显。这是中国大陆的一个很特殊、很突出的地震现象，独一无二。

检索1720—1998年的278年里，华北$M\geqslant6$与川滇$M\geqslant7$地震，全部录入，几乎全部是一一对应，共有27组。其中时差1年之内13组，占48.1%，2~3年之内5组，占比18.5%，4~5年4组，占比14.8%，6~22年共5组，占比18.5%，1~5年共占81.3%。由此可见其时空相关程度是非常高的。而且从1720年开始，相关性随时间明显增高，从1815年后的23组中只有1组（No.18）时差超过4年（达到7年），其余22组都在4年以内。特别是在1960—2000年地震的节拍很一致（图6）。但是2008年汶川地震和2013年芦山地震后，华北至今尚未发生相应的地震。

从1720年向前追溯，情况陡变，1600—1719年的119年里，两区域截然相反，华北处在历史最活跃期（地震大释放期），$M\geqslant6$地震15次，$M\geqslant7$地震5次，$M\geqslant8$地震3次。而这119年里西南处在非常平静的休眠期，仅发生1次7级地震，差异十分显著。再向前追溯到1480—1599年，这119年内共6组地震，对应较好。1480年前历史地震遗漏较多，不做讨论。从以上3个时段，1480—1599年（119年），对应较好，1600—1719年（119年）对应很差，截然相反，可说是典型负相关，1720—1998年（278年）对应很好，相关程度很高。这可能反映了一种较长周期的区域性地震活动方式的交替转换。

对1966—1976年川滇—华北地震两头跳迁问题，地震地质学家就一直在思索讨论，如著名地震学家顾功叙教授提出“距离激发”效应。许绍奕教授等提出用“地壳屈曲”变形来解释（刘杰等，2017）。但对1600—1719年两区完全相反的情况尚不能解释。而更现实的问题，2008年汶川8级和2013年芦山7级地震后，华北没有相对应的地震，是对应期已结束？还是华北新的强震即将发生？都是未知数。而上述看起来很简单的现象，成因却很复杂，理论解释也很困难。因此，对于这种特殊的迁移，或者是一种力学相关现象，其内在机制值得进一步关注和深入研究（许绍燮，2011）。

1.5 地震的等间距性与规则几何图像

在高潮期集中发生一组大震，它们的空间分布似乎有一定的秩序，平面分布上呈现不同类型的规则几何形态，彼此间水平距离大致相若。主要实例包括：

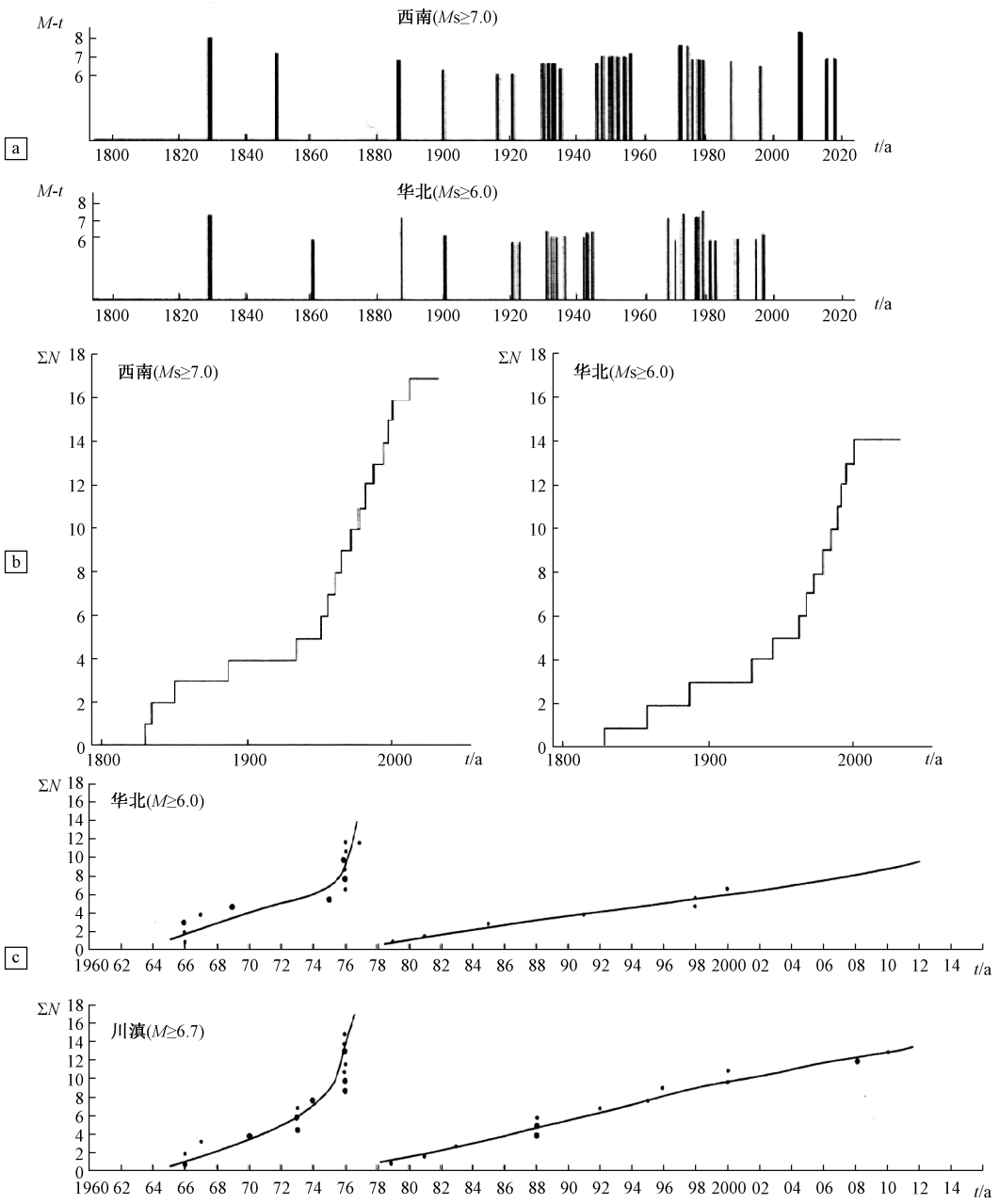
（1）1966—1976年河北平原、渤海盆地的邢台—渤海—海城—唐山序列，4个地震震中构成规则四边形，每个边长都在330 km左右（图7a）。

（2）1668—1679—1695—1739年中国北方4个大震间距都在550 km左右。平面上呈横写S形与大陆北方断裂体系一致（图7b）。

（3）1973—1976年炉霍、大关、松潘地震分布呈三角形，边长都在400 km左右。

（4）1970—1976年通海、龙陵、盐源、宁蒗地震呈三角形分布，平均每边长350 km左右（图7c）。

从历史地震随时间分布来看，一个地震活动期长达十几、几十或上百年，几个大地震集中发生在某个有限的地震带或区域，下一个活动期，又会换一个区带。这表明在一个特定时期内地震应力的积累相对集中于某一个特定构造区带或地壳块体内。这个特定区带面积有限，同时孕育几个大震，意味着同时有几个凹凸或强固点。每个点的应力集中和能量积累都需要一个较大的震源体（岩石体积），且每个孕震区必然要占据一定的空间，且较一致，但地壳厚度有限、蕴震层有限、无法再向上下延伸，这一块地壳体积受到限制，所以只能向外围扩张要求有个与其体积适应的震源半径，在高潮期中，几个大震同时孕育，都保持彼此的独立空间，也就要彼此之间保持一定的



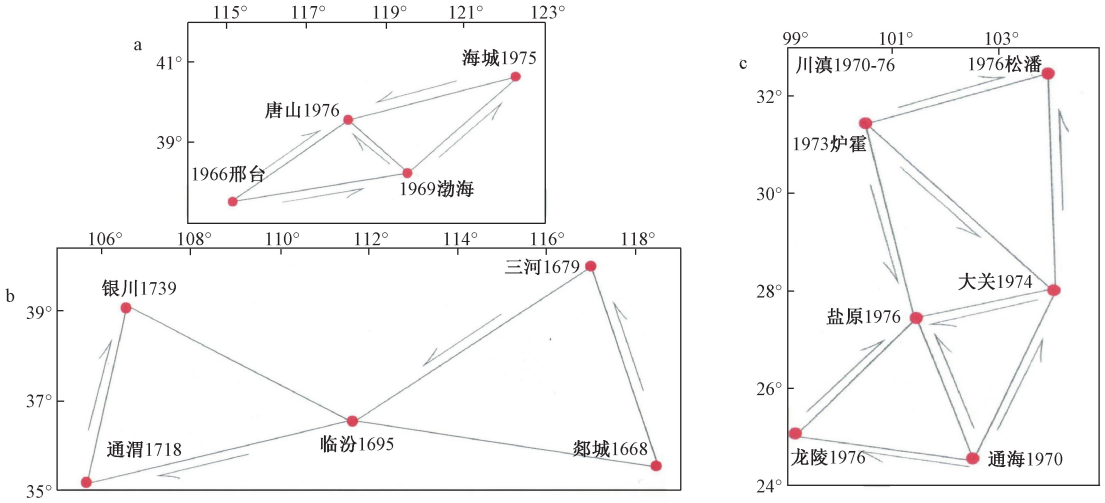
a—*M*-*t* 图；b—Σ*N* 图；c—1960—2014 年 Σ*N* 图

图 6　1800—2014 年华北—川滇强震时序图

Fig. 6　Time sequence diagram of strong earthquakes in North China, Sichuan and Yunnan from 1800 to 2014

距离，这就是等间距性的可能原因。这个特点对于防震减灾布署和未来大震位置估计也是个重要的参考依据。

应该特别指出，在纵向迁移中，有一个十分重要的“伪反折”现象，即在迁移后期，突然出现回头反向，但震级较小，发生于大震向下一站迁移之前，好像迁移反向或结束，实则后面在迁移前方将发生显著大震。可以形象地称为“声东击西”，需要特别注意。比如 2001 年昆仑带可可西里 8 级地震后，到 2008 年汶川 8 级地震前 2 个月，在可可西里地震以西发生和田 7.3 级地震，好像地震迁移反向，改为向西迁移，实际上不久便在东部发生了汶川大震，并引发区域地壳应力场变化及相关的强震活动（丰成君等，2018）。这种情况在全球板块边界地震迁移序列中很普遍。例如 1939—1975 年土耳其—大西洋迁移，当大震从东向西迁移到地中海（1956 年 7 月 9 日爱琴海 *M* 7.8）后，于 1967 年 7 月 22 日发生土耳其 *M* 7.1



a—1966—1976 年华北大震分布；b—1668—1739 年华北西北大震分布；c—1970—1976 年川滇大震分布

图 7 地震高潮期大震组图

Fig. 7 Seismograms of frequent periods of large earthquakes

地震，仿佛地震向西迁结束，已折返向东迁。实则是 1968 年 2 月 19 日在地中海发生 7.5 级大震，1967 年土耳其 7.1 级地震是“声东击西”。形象的说，好像在向前激发下个大震前遇到阻力只好“后退”了一步，“准备”更大的“向前跳跃”。这与破裂方式有关，很多地震不是单纯单侧破裂，而是不对称双侧破裂，在主破裂反方向会有小规模破裂，并会扩展传播，在反方向激发小的地震。可见迁移现象是很复杂的。这就要求在大地震发生后，需要及时地利用地震台网记录，通过地震波形分析确定其破裂扩展方向与类型，并结合活动构造资料等对未来地震迁移方向做出推测或预判。

2 地震的横向迁移

地震的横向迁移是指地震沿着与板块边界垂直的方向（即沿边界带法线方向）向板块内部顺序迁移，是横跨板内地震构造带的迁移。

2.1 西太平洋板缘俯冲带—中国大陆的地震横向迁移

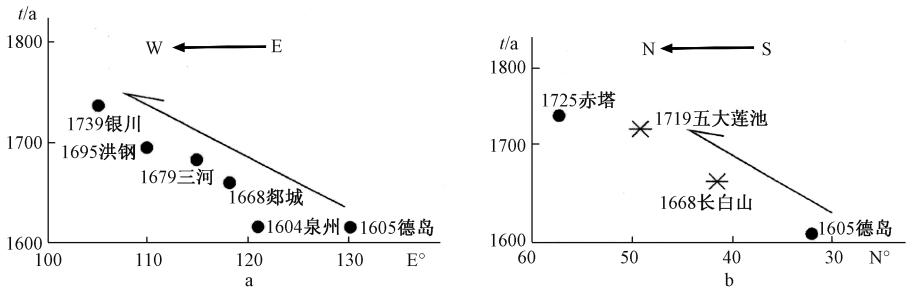
在板块边界或深大断裂上发生巨大地震（$M>8.0$），破裂带规模往往很大，长度可达几百千米，甚至上千千米，跨越几个甚至十个经纬度，在强大的水平向、垂直向或斜向的压应力、张应力或旋扭力偶作用下，引起断层两盘岩石体发生体应变和几米到几十米的位错，并引起重力位变化，完成这种变化的全过程从地震瞬间开始可以延续几个小时，甚至几十个小时才结束。尽管地震断层有逆冲、正断、走滑之分，变形方式有所不同，但总体特征上都是如此的。地震破裂除在瞬间释放短周期弹性波以外，还会陆续释放中—长周期、中—慢速度的非弹性波，它不仅沿破裂走向传播也向断层两盘传播，这在最近的尼泊尔大地震中有很好的表现（董杰等，2019；霍景焕等，2020），即与断层走向垂直的方向传播，称为形变波和塑性波，这可在大震后对形变台网数据分析中得到确认（吴中海等，2014；赵根模等，2015）。其特点是周期长、速度慢、能量大、衰减小、传播远，因而能远程触发其他的已趋临界状态的断层发生大地震，从而导致水平面上的“地震接力”现象，并引发由一系列大震构成的“横向迁移”图像，与常见的“纵向迁移”不同。如果在同一条俯冲带上，几个大震在短期内（<10 年）同时发生，形变波会连成一片，则这种横向触发-迁移效应更加明显，规模更大。而且它不仅能触发地震，还能触发火山爆发。表明这类低速形变波不仅在地壳内传播，而且会在壳-幔分界面甚至可能在地幔上层传播。

首先根据日本海沟和中国大陆、朝鲜半岛地震目录大地震，按现代地震断层面解观测可知日本海沟特大震大多是逆冲型，且断层面与海沟平行。采用公式 $\lg L=0.6M-2.9$ 估算出地震断层长度，然后依据 Kasahara（1979）、見野和夫（1988）及 Bott and Dean（1973）给出的形变波速实测和理论推导

数值和实际地震发生时间空间的拟合方法确定，并绘出等时线图。以下给出几个典型实例（Bott and Dean，1973；Kasahara，1979；見野和夫，1988）。

2.1.1　1600—1739 年东亚大地震与火山活动同时由东向西的大规模迁移序列

1600—1739 年是中国有史以来东南沿海、华北和南北带北段最重要的地震高潮期，特大震数量之多，强度之大，活动期延续时间之长都居历史记载的首位。而且方向性非常明显，从东向西顺序推移。多少年来科学界对此没有解释，一直是个地震“悬案”。其相关信息和总体特点如下（图 8、图 9）：



a—从东向西；b—从南向北（圆点为地震，米号为火山）

图 8　1600—1739 年日本岛弧-亚洲大陆特大地震及活火山喷发事件迁移时空分布图示

Fig. 8　Spatial and temporal distribution diagram of the great earthquakes and active volcanic eruption events in Japan island arc-Asia continent from 1600 to 1739

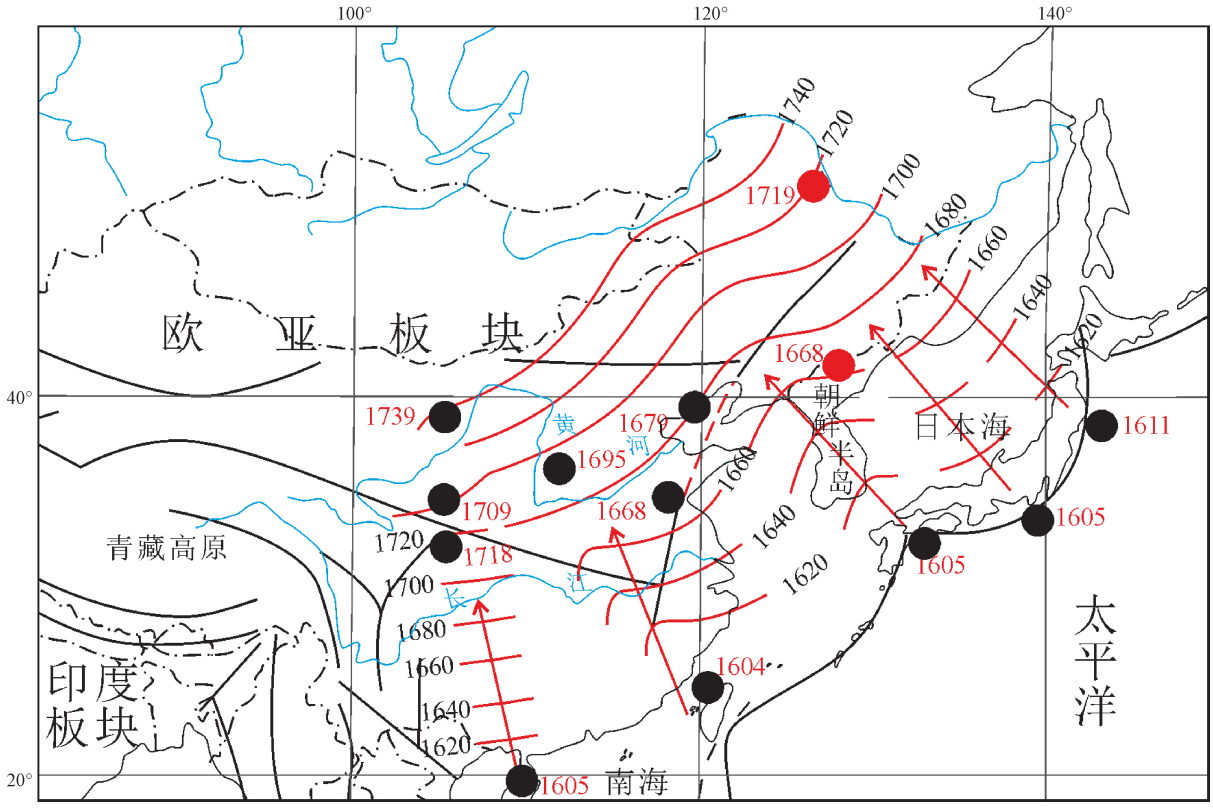


图 9　1600—1739 年西太平洋俯冲带—亚洲大陆的地震及火山活动横向迁移与低速迁移（赵根模和姚兰予，1995）（黑色实心圆为地震，红色实心圆为火山，曲线为模拟形变波波阵面，箭头为波传播方向）

Fig. 9　Transverse low-speed migration of earthquakes and volcanic activities on the West Pacific subduction zone-Asian continent from 1600 to 1739 (Zhao and Yao, 1995) (black solid circle indicates earthquake; red solid circle indicates volcano; curve indicates deformation wave front; arrow indicates direction of wave propagation).

（1）从公元 180—1993 年共 1813 年，从郯庐断裂到南北带北段共发生 $M \geqslant 7.5$ 地震 19 次，平

均发生率 0.01 次/年，$M \geqslant 8$ 地震 8 次，平均发生率 0.004 次/年。而在 1668—1739 年共发生 $M \geqslant 7.5$ 地震 6 次，$M \geqslant 8$ 地震 4 次，在 71 年，即在 3.8%的时间内发生 31%的 $M \geqslant 7.5$ 地震和 50%$M \geqslant 8$ 地震（年发生率分别是 0.084 次/a 和 0.056 次/a），比长期平均年发生率高出 8.4 ~12 倍。

（2）与地震同步，在中国大陆东北的长白山和五大莲池休眠火山突然爆发，这在中国历史的记载中也是罕见的，特别是五大莲池火山是历史文献中唯一有记载的火山爆发。此前它们处于长期休眠状态。

（3）1719 年五大连池火山爆发后，1725 年俄罗斯西伯利亚赤塔附近发生 M 8 级大地震，是该区域历史记载最大地震。

（4）朝鲜半岛 1597—1642 年没有 $M \geqslant 6$ 级地震，属平静期（45 年）；1643—1681 年为活跃期（38 年）发生 $M \geqslant 6$ 地震 6 次，1681—1727 年为平静期（46 年）。1643 年开始活跃期，比中国大陆早 20 余年。

（5）1600—1605 年中国东南沿海闽—粤—琼 3 次大震，是中国历史上东南沿海最大规模的地震记录。

（6）1605—1611 年日本南部海域—关东—三陆 6 年发生 3 次 $M \geqslant 7.9$ 大震，其在日本历史上也是很突出的，此前 93 年中只发生一次大震（1586 年），其后 66 年是平静期，没有 $M \geqslant 7.9$ 级地震。

综合上述，可以推断日本岛弧区在 1605—1611 年伊势湾、南部海域、三陆等地连续发生大地震引起强大形变波向西传播跨越日本海，在 1640 年前后掠过朝鲜半岛，激发 6 级以上强震。1660 年左右进入中国大陆，同时中国东南沿海 1600 年、1604 年和 1605 年发生南澳 7.0 级、泉州 8.0 级和海南岛 7.5 级大震。与上述日本地震形变波并进联合，激发已处于准临界态的郯庐大断裂 1668 年发生 8.5 级大地震（该震此前已有 187 年环形空区平静期），同时触发 1668 年长白山火山爆发。郯城大震发生，其从东向西逆冲断层运动造成断层东西两盘巨大位错，也产生强大形变波，从而与日本岛弧传播的形变波迭加，继续向西转播，能量更大，速度加快，形变波等时线间距增大明显，就是证明。进而激发 1679 年三河、1695 年洪洞、1709 年中卫、1718 年通渭、1739 年银川诸大地震，以及 1719—1721 年五大连池火山爆发和 1725 年俄罗斯赤塔大地震。此外还有 1631 年湖南常德 6.5 级地震。

依据 Kasahara（1979）与見野和夫（1988）在日本地形变观测站垂直形变连续观测记录数据分析，分别得出形变波速为 10~100 km/a 和 20~30 km/a，以此数据为准，选择 10 km/a、20 km/a、30 km/a、40 km/a、50 km/a、60 km/a、70 km/a、80 km/a、90 km/a、100 km/a 的速度进行正演，同时以中国大陆和朝鲜半岛实际发生地震的时间空间进行反演对比。两种方法互相拟合，推导出实际的平均形变波速度（图 9 中的等值线代表形变波波阵面），同时考虑到泉州和海南岛地震形变波的影响，获得了几条路线的形变波和地震迁移图像。形变波传播与地震迁移速度保持在 21.2 km/a 左右。另外发现可能还存在较高速度的第二类形变波，V = 57 km/a 左右。例如 1605 年德岛地震可能触发 1624 年江苏扬州 6 级地震，可称为第二速度或中速。前者称为第一速度或低速（图 9）。低速迁移能量耗损少、能量大、传播远。中速迁移与高速耗损大、传播距离小。后者不会引起长距离大地震，只会引发小距离中强地震，比如 6~7 级地震。一般在朝鲜半岛和大陆东部沿海（Kasahara，1979；見野和夫，1988）。

通过分析上述地震迁移实例可以发现以下一些特点：

（1）几条由不同大震激发的形变波路径，其速度都分布在上述 Kasahara 和见野和夫依据形变观测站记录分析给出的范围内，一致性很好，集中在 20 km/a 左右。同时还可发现存在第二速度约为 55 km/a 左右。前者可称第一速度，或低速度，能激发中国内陆特大地震。后者较为次要，为第二或中速度（Kasahara，1979；見野和夫，1988）。

（2）地震的横向迁移能解释 1668—1739 年间中国大陆东部全部特大地震的发生时间与空间分布特征，无一例外。另外，也可以解释 1643 年前后朝鲜半岛中部的 6 级以上地震的发生时间与空间分布特征，以及该时期长白山、五大连池火山爆发及西伯利亚贝加尔地震的时间与空间分布特征。

（3）地震迁移图像也显示，1668—1695 年迁移速度明显加快，等时线间距加大。暗示可能存在郯城大震形变波的接力迭加效应。

上述结论是从日本海沟和中国东南沿海开始的地震形变波触发已处于准临界态的朝鲜半岛和

中国内陆特大地震和火山爆发的一连串事件，循序由东往西迁移，方向性是一贯到底的，很有规律，没有人为选择。显然不是偶然的，而应该是客观存在的。为进一步证实这一现象的客观存在性，下面可进一步给出更多实例来证明。

2.1.2　1498—1654 年迁移序列

1498 年 9 月 20 日日本静冈发生 8.6 级地震，虽然是单个地震，但规模很大，断层长度可能达到 300 km，其形变波向西进入中国大陆可能触发了 1597 年中国渤海 7.5 级地震及中国长白山火山爆发和 1654 年中国天水 8 级大震，其迁移速度 V=20.8 km/a（低速）。同时 1498 年日本静冈地震与 1556 年日本关中 8 级大震可能存在第二形变波触发关系，迁移速度 V=48.4 km/a（中速）。

2.1.3　1586—1654 年迁移序列

1586 年日本伊势湾 8.2 级地震与 1652 年中国天水 8 级地震可能存在触发关系，迁移速度约 46 km/a（中速）。另外发现 1586 年日本伊势湾 8.2 级地震与 1652 年中国安徽霍山 6 级地震可能也存在类似触发关系，迁移速度为 27 km/a（低速）。此外，与朝鲜北部 1597 年 6.1 级地震可能也存在触发关系，速度达 280 km/a，后者为高速迁移，为第三速度。

2.1.4　1677—1815 年迁移序列

1677 年日本三陆 8.1 级地震，形变波激发中国大陆 1815 年 10 月 23 日山西平陆 7.0 级地震，速度约 24.5 km/a（低速）。

1677 年地震可能也参与触发了 1739 年银川大震，速度为 60.4 km/a，为中速。另外 1677 年地震还可能触发了 1681 年朝鲜半岛中部 6.6 级地震，形变波速度达 320 km/a，为高速迁移。

2.1.5　1703—1879 年迁移序列

1703 年 12 月 30 日日本千叶发生 8.2 级大震，1707 年日本南部海域发生 8.4 级大震，形变波触发河北磁县 1830 年 7.5 级大震，后又触发 1879 年甘肃武都 8 级大震，速度 V=20.4 km/a，为低速（图 10）。同时，1703、1707 年地震也可能触发朝鲜半岛北部 1727 年 6.2 级地震，速度大约 50 km/a，为中速。

2.1.6　1763—1927 年迁移序列

1763 年 1 月 29 日日本青森发生 8 级地震，形变波触发了中国大陆 1920 年海原 8.5 级大震和 1927 年古浪 8 级地震，V=25.2 km/a（低速）（图 11）。另外，在 1763 年日本青森地震与 1815 年中国平陆大地震之间也存在触发关系，其 V=62.1 km/a，是第二迁移速度（中速）。

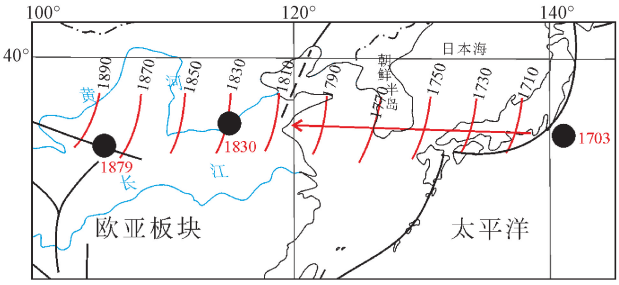


图 10　1703—1879 年地震横向迁移图

Fig. 10　Transverse migrations of earthquakes from 1703 to 1879

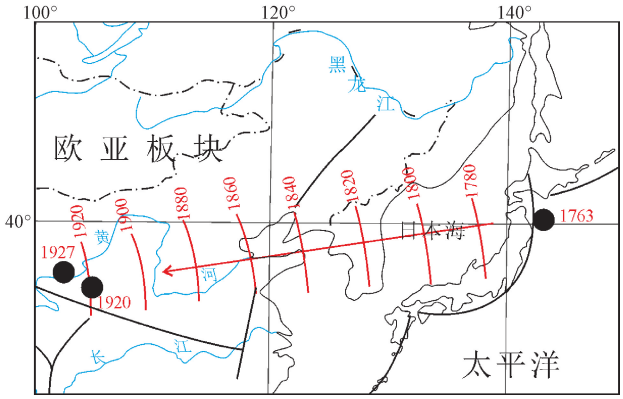


图 11　1763—1927 年地震横向迁移图

Fig. 11　Transverse migrations of earthquakes from 1763 to 1927

2.1.7　1793—1937 年迁移序列

1793 年日本三陆 8.3 级地激发 1888 年中国渤海 7.5 级地震和 1937 年中国山东菏泽 7.0 级地震，速度约为 20.8 km/a（低速）。

另外 1793 年日本三陆地震可能还参与触发了 1930 年中国磁县地震速度约 55 km/a（中速）。

2.1.8　1854—1888 年迁移序列

1854 年日本南部海域、东部海域二次 8.4 级地震触发了中国渤海 1888 年 7.5 级地震与长白山火山爆发，速度 55 km/a（中速）。

2.1.9　1891—1910 年迁移序列

1891 年 日本岐阜 8.4 级地震触发南黄海 1910 级 7 级地震，迁移速度约 60 km/a（中速）。

2.1.10　1896—1976 年迁移序列

1896 年日本海沟 8.4 级、1897 日本秋田 8.3 级、1898 年日本三陆 8.7 级大震、1910 年中国台湾基隆东北 7.75 级大震、1911 年硫球 8.1 级等 8 个大震，这几个大震集中在 15 年中发生，规模空前，能量巨大，时间集中。它们的形变波联合叠

加触发了中国大陆华北 1966 年、1969 年、1975 年、1976 年的邢台、渤海、海城和唐山大震，这是华北平静 78 年来最大地震序列。V=21.5 km/a 左右（低速）（图 12）另外，中国台湾 1910 年、硫球 1911 年中国地震可能还与 1937 年荷泽 7.0 级地震有关，V=51.8 km/a（中速）。

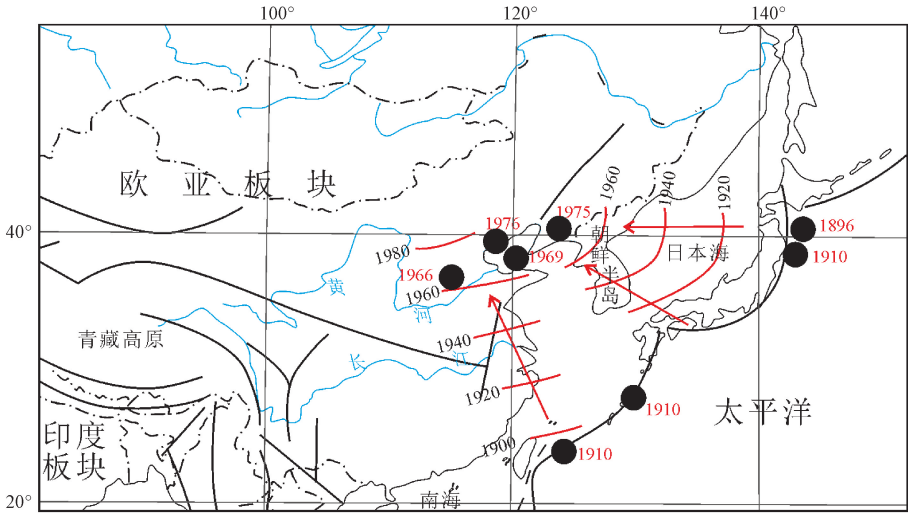


图 12 1896—1976 年地震横向迁移图

Fig. 12 Transverse migrations of earthquakes from 1896 to 1976

2.1.11 1933—1975 年迁移序列

1933 年 8.3 级—1938 年 7.9 级日本三陆大地震与 1975 年中国海城地震之间可能存在第二类触发关系，V=53.3 km/a（中速）。

综上所述，在 1498—1976 年间 400 多年间中国大陆东南部、华北及西北全部 7.5 级以上和部分 7.0 级以上大震的发生时空分布都与上述横向迁移存在密切的触发和迁移关系。7.5 级以上地震与之相关者占比 100%。而同期日本南部海域、东部海域、关东、三陆地区 17 次 7.9 级以上大震与之相关的，占比 14/17，即 82%。无论在大陆或海沟，不是个别现象，具有普遍性。按迁移速度分为三类，第一类是低速度从 18.4~25 km/a，平均 V=20.8 km/a，比较稳定一致，是最主要的类型。第二类是中等速度，在 48.4~62.1 km/a，平均 54.5 km/a。第三类只在个别情况存在的高速迁移，速度约 300 km/a。

虽然 1400 年以前地震记录缺失很多，但仍可见到：

（1）1408—1556 年迁移序列 1408 年日本海沟 7.0 级地震形变波触发了 1502 年 10 月 17 日山东濮城 7 级和 1556 年 1 月 23 日华县 8 级大震，速度约 18.4 km/a，但是 1408 年地震震级偏小，（据历史资料推测，可能有较大误差）仅供参考。

（2）684—839 年迁移序列，是从 684 年日本四国近海 8.4 级地震起始，839 年触发中国岷县 7 级地震，其 V=19.5 km/a。

（3）1185—1303 年序列，1185 年日本滋贺 7.4 级地震可能触发 1303 年中国洪洞 8 级地震，V=20.7 km/a。

（4）1257—1303 年序列，1257 年日本相模湾 7 级地震与 1303 年中国洪洞地震也可能存在触发迁移关系，V=59 km/a 左右。但是 1408 年、1185 年、1257 年地震震级偏小，是据历史记录推定的，是否准确、是否有能力触发，尚存疑问。由于历史资料震级误差大，缺失也多，所以 1498 年以前的资料仅作参考。

进一步指出的是，历史资料中特别缺少中国台湾—硫球一带的大震记录。这很可能是历史大震记录未经仔细系统地收集所致，中国台湾也缺少历史地震资料。但根据所处的板块构造环境推断，1900 年以前这两个地方板块俯冲带不大可能处于绝对平静，推测是历史地震研究缺位造成的假象。因此，如果中国台湾、硫球历史地震资料发掘今后获得重要进展，定能为这方面研究提供更丰富的例证。

为了更加完整、更加系统地认识上述地震横向迁移，进一步证明其不是偶然的巧合，而是有规律的现象。可进一步通过分析公元 1400—2000 年间的地震时空分布图加以了解（图 13）。除了上

述 1400 年以后的迁移序列。在历史资料不全的 680—1400 年也可初步分辨出五个迁移序列，三种迁移速度分布在 14.5～20.6 km/a、45 km/a 以及 300 km/a 左右。与上述 1400—2000 年的迁移速度情况很接近，不过由于 680—1400 年间历史地震缺漏较多，尚难肯定，有待进一步分析。

按照初步总结出的三种波动平均速度值 20.8 km/a、54.5 km/a、300 km/a，可对 2011 年日本宫城 9 级大地震的形变波到达时间进行外推预测，对于这些时间空间的中国大陆大震孕育区，成熟度较高者，特别是已有长期环形围空图像的地点应加强防震措施。应指出，其中 20.8 km/a 低速迁移最重要，影响最大。54.5 km/a 的中等速度次之，300 km/a 高速度影响较小（图 13）。由图可见其对中国大陆大地震触发效应须经过几年到几十年才会到达与显现。所以日本宫城大震后有部分专家学者纷纷发表谈话，预言即将引起大陆大地震，结果全部落空，虚惊一场，就可能是这个原因。由于快速到达的短周期弹性波（体波、面波）衰减快，快速到达大陆时能量耗损，很难触发大震，只能触发小震，到达中国华北约在 2018—2019 年。中短周期弹塑性波衰减也较快，可能在朝鲜半岛和中国大陆东部引发中强震，到达中国华北在 2030 年左右。而长周期、低速度、低衰减、高能量的形变波约在百年后才会触发大陆腹地发生大地震，影响深远。初步估计，2070 年左右到达华北，2140 年左右到达南北带北段。但最值得注意的是，1896 年、1897 年、1898 年先后在日本海沟发生的 M 8.4、秋田 M 8.3、三陆 M 8.7 共三次大地震的低频形变波可能已经到达中国华北地区，并可能于 2030 年左右到达南北带北段。因此，当前可能具有在山西、陕西、甘肃、宁夏等区域激发大地震的潜在影响。但由于受到资料缺失限制，尚未能对其它大陆地震横向迁移进行系统分析。

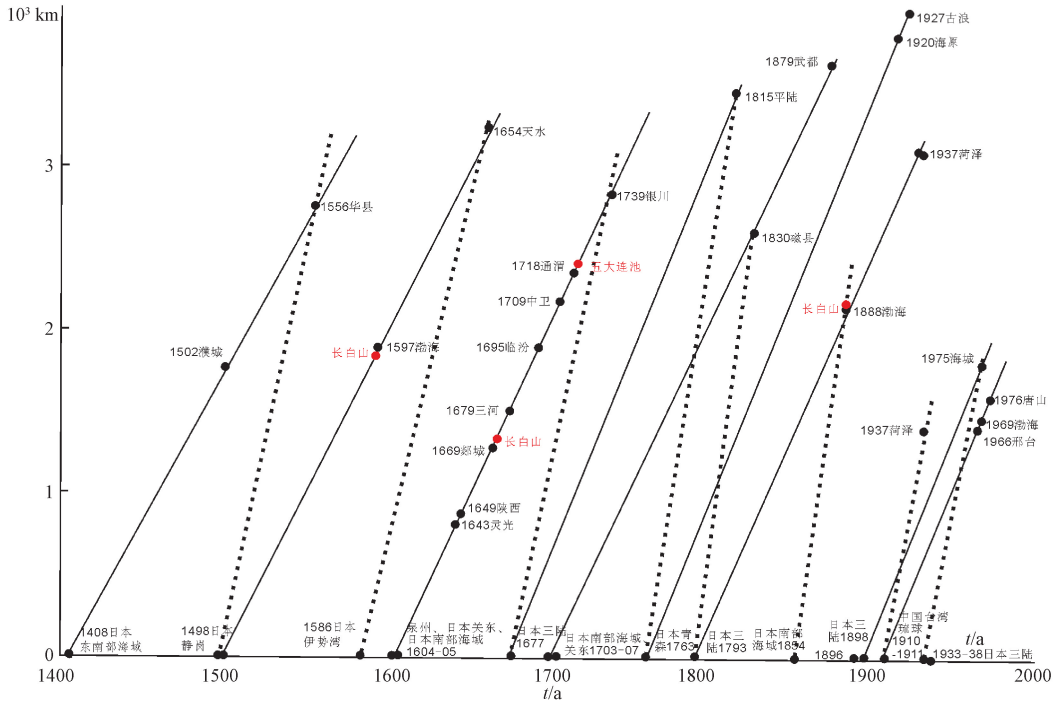


图 13　1400—2000 年东亚大地震横向迁移时空分布图象（黑色直线为第一速度（低速），虚线为第二速度（中速），黑色实心圆为地震，红色实心圆为火山爆发，速度单位 km/a）

Fig. 13　The spatial and temporal distribution of the transverse migration of the East Asian earthquakes from 1400 to 2000 (The velocity unit is km/a. Black line indicates the first speed (low speed); dashed line indicates the second speed (intermediate speed); solid black circle indicates earthquake, solid red circle indicates volcanic eruption)

3　深源地震的迁移

深源地震迁移很早就有研究，专指沿着消减带滑脱面从浅部向深部或由深部向浅部的迁移。其机制介于纵向与横向迁移二者之间，即破裂沿着滑脱面扩展与转播，与纵向迁移有些相似又有区别。迁移方向又与消减带走向垂直，这与横向

迁移也有些相似。并局限在特定的板块俯冲带深源地震区。以下举实例说明。1908—1918 年日本海沟—东亚大陆地震迁移，速度 120 km/a，历时 10 年；1931—1940 年，速度 140 km/a，历时 9 年；1968—1973 年地震迁移，速度 280 km/a，历时 5 年；1909—1911 年厄瓜多尔—哥伦比亚地震迁移，迁移速度 260 km/a；1922—1926 年智利—阿根廷地震迁移，迁移速度 250 km/a；1960—1972 年秘鲁—巴西地震迁移，迁移速度 240 km/a；1950—1955 年智利—巴西地震迁移（图 14），迁移速度 700 km/a。

另外，在印度洋板块与太平洋板块的边界也存在相反的迁移图像，即自下而上和自上而下同时存在。1940—1953 年中国大陆—日本地震迁移，其速度约为 152 km/a；1933—1938 年中国大陆—日本地震迁移，速度约为 250 km/a；1927—1929 年棉兰老群岛地震迁移，自上而下和自下而上迁移速度一致，皆是 250 km/a（图 14、图 15）。

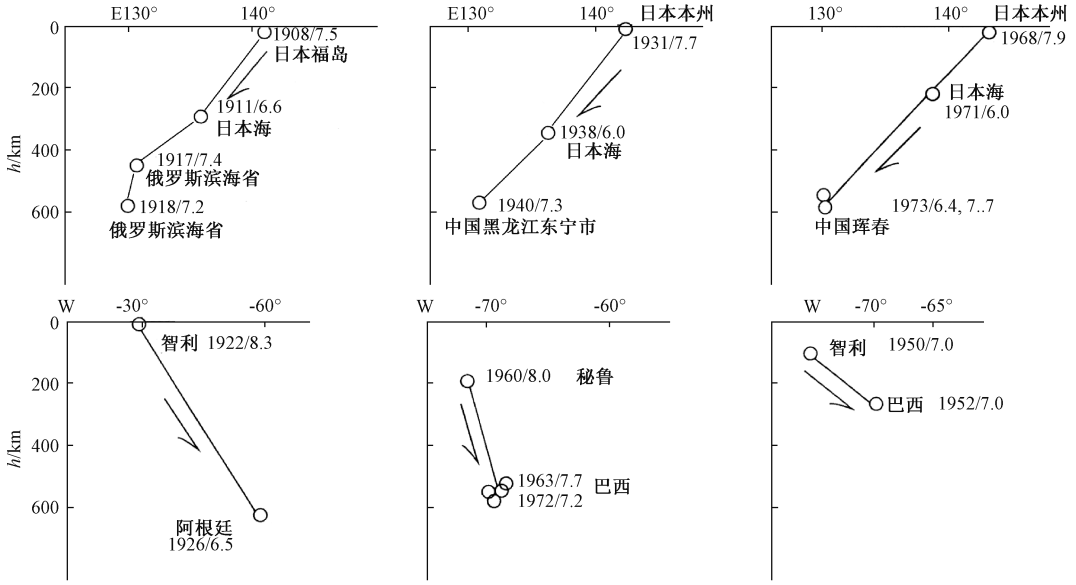


图 14 环太平洋俯冲带深源地震迁移

Fig. 14 Deep source seismic migration of the Circum Pacific subduction zone

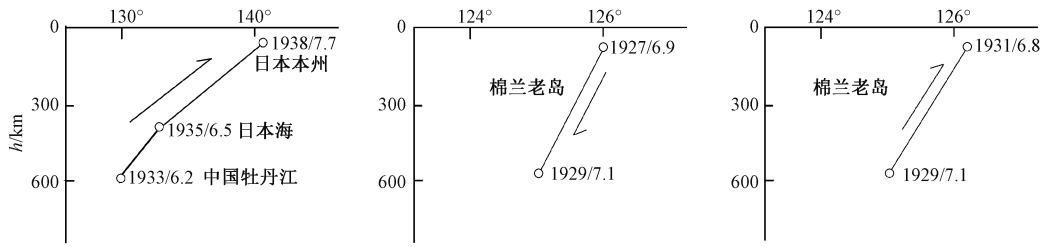


图 15 自下向上迁移和往复式迁移

Fig. 15 Bottom-up migration and reciprocating migration

关于这方面的研究是很重要的，因为涉及到板块运动驱动方式等理论问题。

4 地震迁移机制及相关问题讨论

地震迁移图像是地震“自组织性”的一种表现形式，是在总体无序中出现的局部有序性，而且它们的出现往往是有条件的，主要影响因素及相关问题如下。

4.1 地震丛集期与多强固点模式

地震活动是地球内部能量向地表逸散的重要形式之一，从长期看，从全球看，是均匀的。但从局部看是不均匀的，比如一个地震带或某个板块边界，或某个构造带，总是存在或长或短的积累与释放相交替的周期性或称阶段性，即存在相对平静期与集中暴发期（也称“地震丛集活动期”）。在应变积累的平静期，在一个地块边界带上会形成几个强固点或凹凸点。好比一座桥梁有

几个桥桩共同承受桥梁重荷。随着时间发展，某个桥桩或者说某个强固点率先失稳破裂发生地震。该点原来承担的载荷就要转移到其他桥桩或强固点上，称为应力转移或应力重新分布，从而引起其它点的负荷加重，再加多种应力波的冲击触发，促进其它点也趋于失稳破裂发生地震（吴中海等，2014）。于是地震一个接一个发生，形成破坏的“接力赛跑”或“多米诺”效应。直到积累的应力全部或大部分都释放完毕，这就是地震在一定区域内或沿某一特定方向出现有规律性迁移的实质。正如马宗晋等（1992）指出的，在某地震带中总是存在“多点应力集中”，这实际上是地震迁移发生的常见构造条件，也是一种地震场的常态（赵根模和姚兰予，1995）。

4.2　大陆动力学环境与强固点（凹凸）差异性对地震迁移的影响

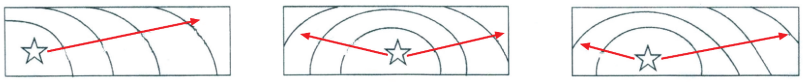
构造驱动力是断层错动与地震破裂发生的根本原因，但作为主要驱动源的大型板块消减的俯冲边界，其上的驱动力分布很不均匀，导致各板块边界的滑动速率与动量也有很大差别。对全球地震而言，在最活跃的板块边界发生地震迁移的可能性更大。同时由于边界带上一系列强固点的规模与强度，应力积累的时间过程也不同，于是就出现迁移起始常从较小地震开始，迁移终点往往是该迁移序列中的最大地震，比如 1939—1960 年南美海沟的迁移，最终触发了智利 9.5 级世界第一大地震，才到达了终点或者说“顶峰”，终于画上了“句号”。这样的例子很多。换句话说，板块边界带上各强固点的差异性决定了迁移的方向，因为板块边界破裂一般会从较小较弱的强固点开始，向较大较强的强固点传播，形象地说是“先易后难”，这很易理解。但偶尔也有相反的情况。

另外，如果内陆地震构造带两端的大陆动力学环境有较大差异，也会影响迁移的路径，比如马宗晋等（1992）和汪一鹏等（2007）发现，南北带南段靠近大板块边界，而北段则与之远离，所以该带大多数迁移序列都从南向北发展（赵根模和姚兰予，1995；宋治平等，2011）。

4.3　地震破裂扩展类型对地震纵向迁移的影响

地震破裂扩展方式对迁移类型和迁移方向也有很大影响。沿着地震构造带、块体边界、断裂发生的地震纵向迁移是最常见的迁移图像，这种地震破裂一般与这些线性边界带总是大致平行的。破裂从一个初始破裂点沿着断层面向外扩展可以有多种形式，但最基本的有三种。即单侧破裂、双侧破裂和不对称双侧破裂三种。破裂从源点开始向单方向扩展，称为单侧破裂，如向两个相反方向同时扩展，称为双侧破裂，如果两个破裂很不对称，一方很大，一方很小，称不对称双侧破裂。破裂扩展过程中遇到另一个强固体，破裂就会停止，并在破裂终端形成一个新的应力高集中区，使前方的强固体从稳定态向失稳发展，从而成为新的不稳定地带，如果该强固体的应变状态已接近临界态，或成熟度较高，那就可能很快发生下一个地震破裂，如果是单侧破裂，且破裂扩展方向远离上一个地震，则会出现地震朝相同方向循序发生的图像，可被形象地称为“单向迁移”。

如果头一个地震是单侧破裂，后继地震也是，并且扩展远离前一个地震就会发生“单向迁移”。如果头一个地震是双侧破裂，向两个相反的方向扩展，两侧的后继地震皆为单侧破裂，且扩展方向远离前一个地震，就会出现“双向迁移”。如果遇到强度大的强固区，使迁移停止下来，迁移结束。有时在区域断裂终止端的破裂可能反向扩展，于是可能出现反向迁移，又称“往复式迁移”（图 16）。



a—单侧；b—双侧；c—不对称双侧

图 16　地震破裂类型（长方形代表地震断层纵断面，星号代表始破裂点，箭头表示破裂方向，弧线为随时间变化位置的破裂前沿）

Fig. 16　Earthquake rupture types (Rectangle represents the vertical section of seismic fault; asterisk represents the beginning point of the crack; arrow represents the direction of rupture and arc line represents the fracture front changed with time)

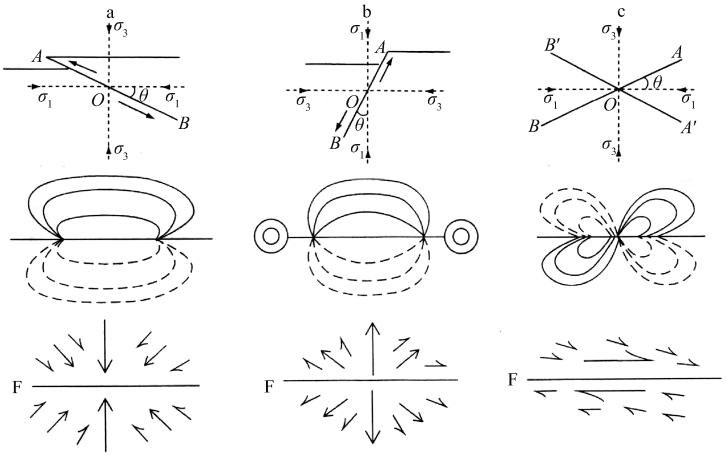
4.4　大地震位错形变波对地震迁移的影响

地震破裂能量释放会辐射弹性波、弹塑性波和塑性波传播，即可以沿着破裂带走向，也可以垂直破裂带走向传播，所以除纵向迁移外，也有横向迁移。大地震位错常常引起几米到几十米的垂直或水平位移，造成巨大的永久形变，同时引

起长周期、低速度、衰减小的弹塑性和塑性波，这里统一称为“形变波”或“蠕变波”。也可以沿与断层走向垂直的方向传播，从一个边界带或断裂带传向另一个断裂带，并触发后者的活动，进而使后者的地震强固区失稳破裂，造成地震“横向跨带迁移”的出现与独特的图像，比如由日本海沟带大地震释放的形变波向西传到朝鲜半岛和中国大陆，造成历史上特大地震从东到西顺序发生的大规模迁移独特图像。它们发生在 1605—1739 年，也发生在 1703—1879 年、1763—1927 年和 1896—1976 年等年份。

这种效应的显著性，不同类型地震有差别，逆冲型地震最大主压应力近水平向并且与断层走向垂直，最大位移也与断层走向垂直，引起横向迁移效应最显著。而倾滑正断层出现此效应的概率居中。走滑型最大主应力与断层走向斜交，最大位移沿走向分布，因而出现这种效应的概率较小。

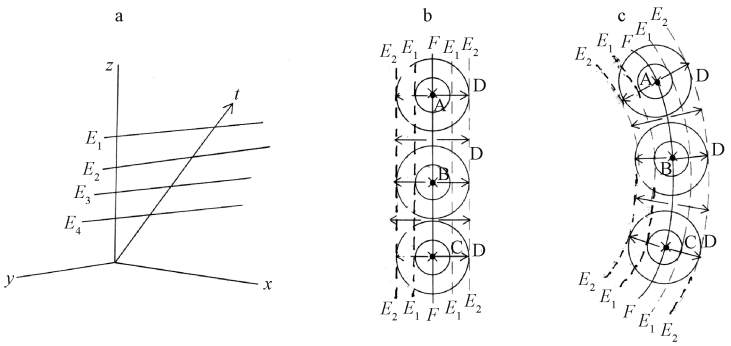
从地震迁移的特点推测，地震形变波可能源于地震断层，从震源区向断层两盘传播，因而它的波阵面大致与断层面平行。比如在海沟，假定断层上每个点都是点状源，都同时辐射形变波，连接起来的等时面就会与断层平行，即与海沟平行。如果几次地震大致同时发生，其引起的形变波也会连成一片，与海沟平行，（图 17、图 18）。如果长达几百、上千千米的地震断层是直线状，波阵面也是直线状。如果断层是弯曲的，波阵面也是弯曲的，比如海沟岛弧地震引发的形变波阵面是与海沟岛弧平行的。



a—逆冲；b—正断；c—走滑

图 17 大地震应力场和形变示意图（上为断层应力场，中为垂直形变，下为水平形变）

Fig. 17 The stress field and deformation schematic diagram of great earthquake (The above diagram is the fault stress field; the middle is the vertical deformation; the bottom is the horizontal deformation)



a—横向迁移（图中 y 轴代表断层走向，x 轴代表时间，z 轴代表与断层垂直方向，即形变波传播方向，$E1$，$E2$，$E3$，$E4$ 数字为波阵面，t 表示形变波随时间传播进程）；b—直线形断层；c—弧形断层（✱ 号为地震破裂带上的点源，圆形为点源辐射波，虚线为波阵面）

图 18 形变波传播方式示意图

Fig. 18 Sketch map of deformation wave propagation mode

4.5　深震迁移的俯冲与牵引模式

深源地震迁移是地震沿着向下倾斜的滑脱面进行的，该面上的地震强固点破裂使滑脱面突然滑动，同时辐射出弹性波、弹塑性波及塑性波，这种能量传递触发下一个强固点失稳破裂，构成迁移序列，迁移沿着滑脱面发生，但是迁移方向与削减带走向垂直，可以说兼有纵向与横向迁移两种特点。深源迁移究竟是从浅部开始向深部自上而下迁移还是从深部开始自下而上迁移，历来有两种不同看法，即向下俯冲和削减牵引两种模式。这还有待对地震观测记录做更详细研究，而且两种方式也可能同时存在（图 19）。

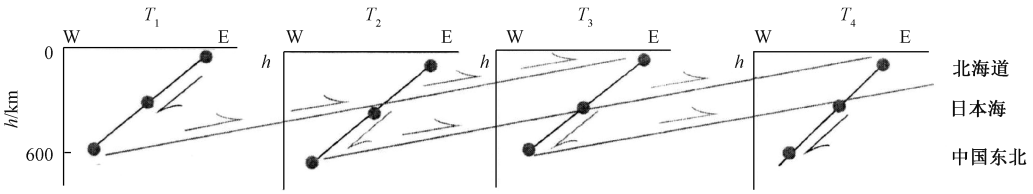


图 19　深源地震迁移的两种模式可能同时存在

Fig. 19　Two modes of deep source seismic migration may exist simultaneously

4.6　双线平行同向迁移—内陆地震迁移的复杂性

这方面的典型实例是唐山大地震。1966 年邢台 7.2 级地震后，1967 年发生河间 6.3 级地震，此时中央地震办公室组织专家讨论地震发展趋势，形成两种相反意见。一种意见主张地震整体沿北东方向迁移直到东西向构造燕山带终止，具体指唐滦地区（李四光 1967 年谈话），而另一种意见认为地震将大致向西南方向的河南省林县方向迁移发展。之后的实际情况是，1967 年河间地震后，北北东向迁移中断，转向东，1969 年在与华北平原地震带平行的郯庐带上发生渤海 7.4 级地震，继而又向北东在 1975 年在辽宁海城发生 7.3 级地震。最后在 1976 年燕山带发生唐山大地震，迁移终止。因此，在此次地震迁移中，从邢台向北东方向的大震迁移出现了双线平行并进和迂回曲折的迁移路径，1967 年河间地震后，渤海 1969 年发生地震，向东迁移，再向北东迁移到海城（1975 年），最后又迂回到燕山带发生了唐山 1976 年大地震，其总体迁移路径证明了李四光先生最初根据构造体系控震特征做出的判断是大体正确的。对于此类特殊复杂的地震迁移图像，Scholz（1977）曾专门总结探讨了其主要特征与内在机制问题，可进一步参考。

4.7　纵向地震迁移的速度问题

很多研究者发现地震迁移速度有快慢之分，即使同一条构造边界，同一地区也有不同，Bott and Dean（1973）曾研究非弹性介质中形变波速度的影响因素，并给出公式：

$$V = 2[(Ebd)/\eta T] \qquad (1)$$

公式（1）中的 E、d、η、b、T 分别表示杨氏模量，弹性层厚度、粘滞系数、粘性层厚度、波动周期。这些因素因地而异。假定一般情况下，d = 80 km，b = 250 km，$\eta = 2\times10$ pa，$E = 10$ dyne/m，$T = 3\sim8$ a，则 $V = 19\sim35$ km/a[3]，这与文中低速度形变波引致地震横向迁移的速度非常接近。如果其中某一个或几个参数随地域改变或波动周期变化，则速度也改变（Kasahara，1979）。

地震纵向迁移速度 V_m 从板块边界到板内相差很大，前者从 $n\times10^2\sim n\times10^3$ km/a，后者从 $n\times10\sim n\times10^2$ km/a。差 1～2 个数量级。而板块边界会聚速率 V_t 一般分布在 $n\times10\sim n\times10^2$ mm/a 范围，而陆内断层滑动速率分布在 $1\sim n\times10$ mm/a 范围，也相差 1～2 个数量级。笔者比较迁移速度 V_m 与构造运动速率 V_t 数据，发现二者之间存在相关，（图 20，表 1）。由于文献中各专家学者给出的构造运动速率多有差别，不尽一致，绘图时用短线段表示其分布范围。

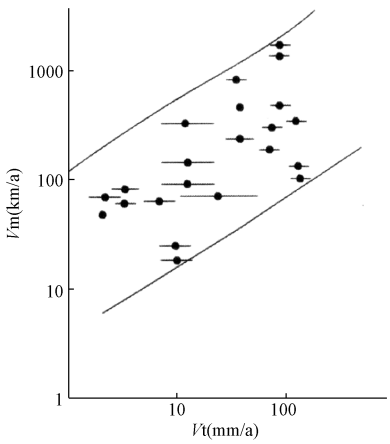


图 20　地震纵向迁移速度 V_m 与地块边界构造运动速率 V_t 的关系

Fig. 20　The relationship between V_m (seismic longitudinal migration velocity) and V_t (tectonic movement speed of block boundary)

表 1 地震纵向迁移速度与构造运动速率比较表

Table 1 Comparison table of seismic longitudinal migration velocity and tectonic movement speed

地震迁移速度		构造运动速率	
地区	V_m/（km/a）	V_t/（mm/a）	资料
南美俯冲带	110，143，320，370，390	79，83，100，111	Kasahara，1979；見野和夫，1988；金森博雄等，1992；洪汉净等，2001
阿拉斯加	450	59，66	同上
阿留申	450	25，27	同上
堪察加	450	82，93	同上
日本西南—菲律宾	275	38，41，57，74	同上
苏门答腊—汤加—新西兰—巴雷尼	614，612，1950，280，640	66，67，79	同上
欧非边界、地中海	85，158，366	7，8，20，28	同上
喜马拉雅	75	12，43，49，61	同上
帕米尔—贝加尔	63，75	3.1，6.1，6.3，2~5，6~12，10~13	同上
南北带	17.9，27.5，210	8，12，16	同上
阿尔泰	63	4.5，7	同上
昆仑	70	6，8.8	同上
喀喇昆仑	18	2.6	同上
祁连山	83	3.8，4.8，5.1	同上
汾渭	60	1.4，2.6	同上
河北平原	40	2	同上

至于如何从理论上阐明上述关系，以及多种迁移速度的存在与差别，可能与各种构造块体活动能力和岩石圈性质等的不同有关，但具体的深层问题还有待进一步研究。

对于地震迁移机制也有多种观点，一是是形变波观点，认为存在某种实体波动，触发地震按波动方向顺序发生，引起迁移。一种是应力触发观点，认为是某地震后应力重新分布并向另一个地震处集中，如此逐个递变，导致迁移。还有学者认为小于100 km/a 的低速迁移是震后应力转移到软流圈，松弛后又转回岩石圈，是弹滞性形变波在触发地震。具体而言，中速迁移（n×100 km/a）可能是应力腐蚀和蠕变传播共同造成。而高速迁移（>1000 km/a）多指小空间范围连续破裂，多重破裂和震群序列。而实际现象也可能是二者的紧密结合，当然这个问题还有待进一步深入研究（Soloviev and Go，1974；Usami，1979；马宗晋等，1992）。

5 主要结论与认识

通过以上分析与讨论可初步得出以下几点主要结论与认识，希望可为今后开展区域性地震危险性分析等提供有益参考。

（1）地震系统是开放式的，地震破裂之间存在或强或弱的相互作用。每次地震应力释放都意味着地壳内部应力转移，能量传递和重新分布，这种传递主要以弹性波、弹塑性及塑性波形式传播，前者有体波、面波，后者有形变波等形式。都会对其他断层或强固点产生影响，或大或小、或正或负，地震迁移类似于“接力赛跑”模式，其“接力棒”就是“应力触发”或“形变波”。

（2）地震迁移可分为纵向、横向迁移及深源地震迁移三大类，其中又包含了多种次级类型。通过初步的归纳总结纵向迁移速度分别是：全球板块边界 $\overline{V}$=569 km/a，次级板块边界 $\overline{V}$=120 km/a，大陆内部 $\overline{V}$=50 km/a。横向迁移速度分别是：东亚 $\overline{V}$=20 km/a 和 50 km/a，美洲 $\overline{V}$=153 km/a。深源迁移：$\overline{V}$=360 km。东亚横向迁移可能还存在300 km/a 速度，尚待进一步观测研究。

（3）地震发生的决定性因素是岩块边界凹凸体和强固区的应力集中与积累，达到破裂极限后，失稳破裂引发地震。大型强固区的积累期—断层段闭锁期可长达几十到几千年，甚至上万年，这从大震前空区图像可以证实。外力触发会对发展成熟的强固区（孕震区）起作用，即已进入准临界状态的强固区。因为它处于非线性应变阶段，与周围介质相比，动力学响应表现得更强烈，更敏感，很容易被触发。而随后的地震迁移则涉及触发和响应两个方面。

（4）地震发生有可能受到多种因素影响，包括外部应力和波动传播影响。从弹性、弹塑性到塑性波，振动周期由短到长，传播速度由快到慢，耗散衰减由快到慢，传播距离由近到远，纵向和横向都存在，使地震间相互作用和地震活动图像复杂化。这都增加了监测预报的复杂性和难度，尤其发生时间很难正确预测。这对于地震前兆观测也有影响，除了附近震源体物理化学变化外，还受外来因子扰动，也使“前兆异常”变得复杂化，并造成地震预报难度进一步增大。因此和其他地震现象一样，地震迁移看似十分简单的现象，却对地震的发生过程和区域地震活动图像具有显著影响，但地震迁移是地震总体无序中的局部有序性，对“自组织临界现象”理论研究、构造动力学研究以及地震灾害预测与预防等都有重要关

联，相关问题值得进一步深入研究。例如远距离大震相关性，至今还未能妥当的解释。比如1966—1976 年华北-川滇地震的“呼应”“跳迁”现象是个自然奇迹，十分罕见，可以称为亚迁移。

（5）地震的纵向与横向迁移都存在不同层次和级别，具有多种不同频率、能量与速度的形变波迁移现象。文中仅介绍了其中主要的部分，重点研究了旅行时间长能触发特大地震事件的远程低速高能迁移现象，并非所有类型，比如对余震与中小地震短周期快速的迁移等并未涉及。

（6）文中已提到地震迁移中的“声东击西”等现象和经验，这对于震情趋势分析和防灾等都是很实际的问题，教训也很多，并提醒我们在监测预报中应该很谨慎，避免被假象误导做出误判。而进一步深入研究地震迁移的复杂性，将有助于更正确的了解地震活动习性，减少误判，让预测更有实效，更可靠。

（7）东亚大地震的横向迁移对中国大陆影响很大，与中国大陆震情关系密切，2011 年日本宫城 9.1 级大震形变波对大陆腹地大地震的触发影响可能在十几到几十年后，尚有做好预防的充裕时间，但应予重视。最后要指出的是，在地震迁移中，有必要进一步对地形变和 GPS 台网的长期连续观测数据进行更全面深入的对比分析，这有助于验证或否定与地震迁移机制相关的模式。对于深源地震迁移究竟是由下而上还是由上而下，也需要通过观测加以厘清。这些都是有待进一步深入开展的很有意义的基础性工作。

致谢：本文初步地归纳分类地震迁移，水平有限，疏失之处难免，欢迎指正！论文编写得到中国地震局地球物理研究所赵荣国研究员和中国地质科学院地质力学研究所殷伟德高级工程师的热情帮助，文稿修改的过程中得到了左嘉梦研究生的协助，审稿专家对本文的完善和提升提出了宝贵建议，在此一致表示衷心感谢！

References

BOTT M H P, DEAN D S, 1973. Stress diffusion from plate boundaries [J]. Nature, 243 (5406): 339-341.

Department of Earthquake Disaster Prevention, CEA. 1995. Catalogue of Chinese Historical Strong Earthquakes (beginning from the 23rd century B. C. and ending at 1911). Beijing: Seismological Press. (in Chinese).

Department of Earthquake Disaster Prevention, CEA. 1999. Catalogue of modern earthquakes in China (1912 - 1990) [M]. Beijing: Seismological Press. (in Chinese).

DONG J, WEN H J, LIU H L, 2019. The inner deformation in the earth caused by the 2015 Nepal earthquake Mw 7.9 [J]. Science of Surveying and Mapping, 44 (6): 52-58, 71. (in Chinese with English abstract)

ENGDAHL E R, VILLASENOR A, 2002. Global seismicity: 1900-1999 [M] //LEE W H K, KANAMORI H, JENNINGS P C, et al. International handbook of earthquake and engineering seismology. San Diego: Academic Press, 665-690.

FENG C J, QI B S, ZHANG P, et al., 2018. Crustal stress field and its tectonic significance near the Longmenshan belt, after the Wenchuan MS8. 0 earthquake [J]. Journal of Geomechanics, 24 (4): 439-451. (in Chinese with English abstract)

GU G X, 1983. Earthquake catalog of China [M]. Beijing: Science Press. (in Chinese)

HONG H J, WANG Y P, SHEN J, et al., 2001. The average image and its dynamic significance of the crustal block movement in the Chinese mainland [J]. (6): 17-30. (in Chinese)

HUO J H, MA J Q, ZHANG R, 2020. GPS time series analysis of post earthquake displacement in Nepal [J]. Journal of Geomatics, 45 (1): 40-43. (in Chinese)

KANAMORI H, BOSCHI E. 1992. Earthquake: observation, theory, and interpretation [M]. Seismological Press, 3: 11-394. (in Chinese)

KASAHARA R, 1979. Migration of crustal deformation [J]. Tectonophysics, 52 (1-4): 329-341.

KAZUO MINO. 1988. Migration of Great Earthquakes along the Subduction Zone of the Japan Arc [J]. Earthquake, 41 (2): 375-380. (in Japanese with English abstract)

LEE J S, 1981. China earthquake [M]. Beijing: Seismological Press: 532. (in Chinese)

LIU J, ZHAO G M, WU Z H, 2017. The evolution of seismic activity image in the HIMALAYA BELT before and after 2015 nepal M8. 1 great earthquake [J]. Journal of Geomechanics, 23 (1): 173-181. (in Chinese with English abstract)

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 with English abstract)

MOGI K, 1968. Migration of seismic activity [J]. Migration, 46: 53-74.

RICHTER C F, 1958. Elementary seismology [M]. San Francisco: WH Freeman and Company.

SCHOLZ C H, 1977. A physical interpretation of the Haicheng earthquake prediction [J]. Nature, 267 (5607): 121-124.

SHI Z L, 1986. The world´s earthquake catalog [M]. Beijing: Map Press: 327. (in Chinese)

SOLOVIEV S L, GO C N, 1974. Catalog of tsunamis on the western shore of the Pacific Ocean [R]. Moscow: Nauka Publishing House.

SONG Z P, ZHANG G M, LIU J, et al., 2011. Global earthquake

catalog [M]. Beijing: Seismological Press. (in Chinese)

USAMI T. 1979. Study of Historical Earthquakes in Japan . Bulletin of the Earthquake Research institute, 54, 399-439.

WANG Y P, Ma J, LI C Y, 2007. The migration characteristics of strong earthquakes on the North-South seismic belt and its relation with the South Asia seismic belt [J]. Seismology and Geology, 29 (1): 1-14. (in Chinese with English abstract)

WU Z H, ZHAO G M, LIU J, 2016. Tectonic genesis of the 2015 Ms8. 1nepal great earthquake and its influence on future strong earthquake tendency of Tibetan Plateau and its adjacent region [J]. Acta Geologica Sinica, 90 (6): 1062-1085. (in Chinese with English abstract)

WU Z H, ZHAO G M, LONG C X, et al., 2014. Characteristics and trends of present-day large earthquakes in the southeast margin of the Qinghai Tibet Plateau: preliminary analysis results from the perspective of active tectonic system [J]. Journal of geology, 88 (08): 1401-1416. (in Chinese)

XIE Y S, CAI M B, 1983. Collection of hisrorical earthquake data of China [M]. Beijing: Science Press. (in Chinese)

XU S X, 2011. Earthquake should be able to predict the [M]. Beijing: Seismological Press. (in Chinese)

ZHAO G M, LIU J, WU Z H, 2015. 2015 Nepal earthquake and the future seismic trend of Himalaya orogenic belt [J]. Journal of Geomechanics, 21 (3): 351-358. (in Chinese with English abstract)

ZHAO G M, LIU Y Y, WANG D H, 2005. Retrospect to the migration of Sumatra-Mongolia Earthquakes from 1935 to 1957 [J]. Recent Developments in World Seismology, (9): 6-9. (in Chinese with English abstract)

ZHAO G M, WU Z H, LIU J, et al., 2019. The time space distribution characteristics and migration law of large earthquakes in the Indiam-Eurasian plate collision deformation area [J]. Journal of Geomechanics, 25 (3): 324-340. (in Chinese with English abstract)

ZHAO G M, YAO L Y, 1995. Chinese journal of earthquake migration in East Asia continent [J]. Acta Seismologica Sinica, 17 (4): 440-447. (in Chinese with English abstract)

附中文参考文献

見野和夫, 1988. 日本列島の海溝に沿う巨大地震の移動 [J]. 地震, 41 (3): 375-380.

董杰, 文汉江, 刘焕玲, 2019. 2015 年尼泊尔地震 Mw 7.9 产生的地球内部变形 [J]. 测绘科学, 44 (6): 52-58, 71.

丰成君, 戚帮申, 张鹏, 等, 2018. 汶川 Ms 8.0 地震后龙门山断裂带地壳应力场及其构造意义 [J]. 地质力学学报, 24 (4): 439-451.

顾功叙, 1983. 中国地震目录: 公元前 1831 年—公元 1969 年 [M]. 北京: 科学出版社.

洪汉净, 汪一鹏, 沈军, 等, 2001. 我国大陆地壳块体运动的平均图像及其动力学意义 [J]. 活动断裂研究理论与应用, (6): 17-30.

霍景焕, 马进全, 张睿, 2020. GPS 时间序列分析尼泊尔地震震后位移 [J]. 测绘地理信息, 45 (1): 40-43.

金森博雄, 博斯基. 1992. 地震: 观测、理论和解释 [M]. 北京: 地震出版社, 3: 11-394.

李善邦, 1981. 中国地震 [M]. 北京: 地震出版社: 532.

刘杰, 赵根模, 吴中海, 2017. 2015 年尼泊尔 8. 1 级大地震前后喜马拉雅带地震活动图像演变 [J]. 地质力学学报, 23 (1): 173-181.

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.

时振梁, 1986. 世界地震目录 [M]. 北京: 地图出版社: 327.

宋治平, 张国民, 刘杰, 等, 2011. 全球地震目录 [M]. 北京: 地震出版社.

汪一鹏, 马瑾, 李传友, 2007. 南北地震带强震迁移特征及其与南亚地震带的联系 [J]. 地震地质, 29 (1): 1-14.

吴中海, 赵根模, 刘杰, 2016. 2015 年尼泊尔 Ms8. 1 地震构造成因及对青藏高原及邻区未来强震趋势的影响 [J]. 地质学报, 90 (6): 1062-1085.

吴中海, 赵根模, 龙长兴, 等, 2014. 青藏高原东南缘现今大震活动特征及其趋势: 活动构造体系角度的初步分析结果 [J]. 地质学报, 88 (08): 1401-1416.

谢毓寿, 蔡美彪, 1983. 中国地震历史资料汇编 (Vol. 3, No. 2) [M]. 北京: 科学出版社.

许绍燮, 2011. 地震应可预测 [M]. 北京: 地震出版社.

赵根模, 姚兰予, 1995. 东亚大陆的地震迁移 (一): 从西太平洋海沟到中国大陆内部的巨震及火山活动迁移 [J]. 地震学报, 17 (4): 440-447.

赵根模, 刘砚越, 王大宏, 2005. 苏门答腊-蒙古 (1935-1957) 地震大迁移的回顾 [J]. 国际地震动态, (9): 6-9.

赵根模, 刘杰, 吴中海, 2015. 2015 尼泊尔大地震及喜马拉雅造山带未来地震趋势 [J]. 地质力学学报, 21 (3): 351-358.

赵根模, 吴中海, 刘杰, 等, 2019. 印度-欧亚板块碰撞变形区的大地震时空分布特征与迁移规律 [J]. 地质力学学报, 25 (3): 324-340.

中国地震局震害防御司. 1995. 中国历史强震目录: 公元前 23 世纪—公元 1911 年 [M]. 地震出版社.

中国地震局震害防御司. 1999. 中国近代地震目录 (公元 1912-1990 年) [M]. 地震出版社.

开放科学 (资源服务) 标识码 (OSID):

可扫码直接下载文章电子版, 也有可能听到作者的
语音介绍及更多文章相关资讯