

2011年3月11日日本东北沿海 M_w 9.0 级地震震源破裂过程

郝金来^①, 王卫民^{②③*}, 姚振兴^①

① 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029;

② 中国科学院青藏高原研究所, 北京 100085;

③ 中国科学院大陆碰撞与高原隆升重点实验室, 北京 100085

* 联系人, E-mail: wangwm@itpcas.ac.cn

收稿日期: 2011-03-30; 接受日期: 2011-04-12

国家自然科学基金项目(批准号: 41030319, 40974028)和国家重点基础研究发展计划(编号: 2008CB425701)资助

2011年3月11日13时46分(北京时间), 在日本本州东海岸发生了一次 M_w 9.0 级地震. 根据美国地质调查局提供的定位结果, 此次地震的震中位置为 38.321°N , 142.369°E , 震源深度为 24 km(<http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eqinthenews/>). 地震发生以后, 引发了大规模的海啸, 局部地区海浪高达 23.6 m(<http://news.sina.com.cn/w/2011-03-24/082322-172726.shtml>), 震后日本福岛核电站遭受破坏, 发生了严重的核泄漏. 地震、海啸以及核泄漏造成了重大的人员伤亡与财产损失.

日本群岛位于太平洋板块、北美板块、欧亚大陆板块与菲律宾板块相互作用的区域^[1]. 太平洋板块向西北方向运动, 与北美板块、欧亚大陆板块、菲律宾板块相互作用, 形成了世界上最典型的大型俯冲带——西太平洋俯冲带. 在日本北部, 太平洋板块俯冲到北美板块与欧亚大陆板块之下, 此次地震即发生在该区域的俯冲带上(图 1). 地震的发生改变了此前有关这一地区俯冲带上不会发生 8.0 级以上大地震的认识^[2-4].

地震发生后, 我们于 3 月 12 日发布了此次地震震源破裂过程的初步研究结果(<http://www.igg.cas.cn>). 此后进一步收集各种资料作为补充, 特别是使用了 GPS 观测资料作为新的约束, 与远场波形资料联合进行反演, 得到了此次地震的震源破裂过程结果.

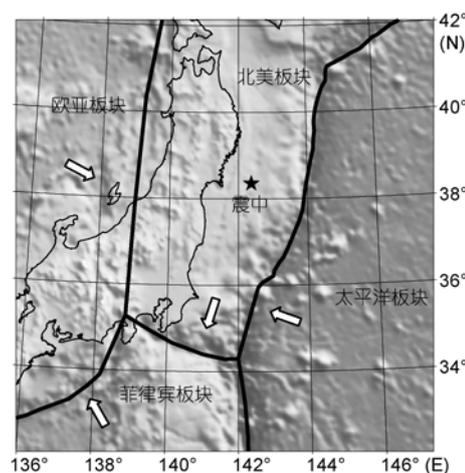


图 1 构造背景图

据文献[2]修改

1 方法

中国地震局、日本国土交通省气象厅、美国地质调查局等机构在震后都分别给出了震源的定位结果. 在进行震源破裂过程研究时, 采用了美国地质调查局给出的定位结果(38.321°N , 142.369°E). 在震后约 2 h, 国际地震学研究联合会(IRIS)即提供了远场波形资料的下载, 利用远场范围(震中距 $30^\circ\sim 90^\circ$)的波形资料, 基于有限断层模型^[5-8], 通过波形反演方法,

可以快速的给出震源破裂过程. 确定破裂过程分两步进行: 首先使用点源模型确定地震的震源深度以及两个节平面, 再根据地质构造背景资料, 确定震源破裂面的几何形态; 然后根据点源模型确定的震源深度以及破裂面, 采用有限断层模型确定破裂面上的滑动时空分布, 得到最终的震源破裂过程结果.

在点源模型反演中, 选取信噪比高, 且方位角覆盖均匀的远场 P 波垂向波形记录, 使用多个三角函数叠加形成震源时间函数, 反演确定震源机制解. 待反演参数为震源深度、节面走向、倾角、滑动角以及震源时间函数. 在有限断层模型反演中, 使用远场 P 波、SH 波以及 GPS 观测资料. 断层走向、倾角以及尺度确定, 待反演参数为每个子断层滑动角、滑动量、破裂传播速度以及震源时间函数的上升时间. 目标函数选取为

$$e = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \left(1 - \frac{\int f_k(t) O_k(t) dt}{\sqrt{\int (f_k(t))^2 dt \int (O_k(t))^2 dt}} \right) w_1 + \frac{1}{3M} \sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^3 \sqrt{(O_{ji} - S_{ji})^2} w_2,$$

其中, $O_k(t)$ 和 $f_k(t)$ 分别表示第 k 个地震台站的理论与观测记录, N 为地震台站数目, O_{ji} 和 S_{ji} 分别表示第 j 个 GPS 台站 i 方向的理论与观测同震位移量, M 为 GPS 台站数目, w_1 和 w_2 为权重因子. 反演方法采用非线性的反演方法——模拟退火方法^[6,9].

2 结果

2.1 点源模型结果

在点源模型反演中, 共使用了 26 个垂向 P 波位移波形记录, 图 2 给出了波形拟合与反演结果. 反演得到节面一的走向 201.8° , 倾角 11.7° , 滑动角 91.6° ; 节面二的走向 20.2° , 倾角 78.3° , 滑动角 88.4° . 两个节面中, 节面一的走向、倾角与俯冲带的实际走向、倾角最为接近, 因此认定节面一为断层破裂面. 点源模型确定震源深度为 22 km, 滑动角显示了此次地震为一次典型的逆冲事件.

2.2 有限断层结果

依据点源模型确定的震源深度以及破裂面走向倾角, 用一条沿走向长 550 km, 沿倾向宽 208 km 的

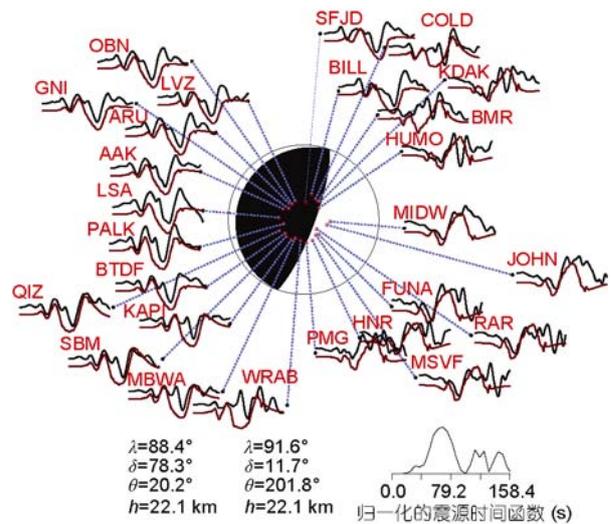


图 2 点源反演结果

共使用了 26 个远场 P 波垂向波形记录, 黑线、红线分别表示了实际波形和理论波形. 反演得到的震源时间函数、震源深度 h 以及两个节面的走向 θ 、倾角 δ 、滑动角 λ 均已给出

断层模拟破裂面, 将之剖分成 $22 \text{ km} \times 16 \text{ km}$ 的 325 个子断层. 使用了 30 个 P 波垂向和 22 个 SH 波切向波形记录, 104 个 GPS 台站的水平与垂直方向的同震位移资料^[10](最大水平位移 5.24 m, 垂向 -1.12 m) 来反演得到断层面上的滑动分布. 图 3 给出了波形以及 GPS 同震位移拟合结果, 波形相关性较好, GPS 同震位移的大小和方向均拟合得比较好.

图 4(a) 给出了最终得到的滑动时空分布. 滑动时空分布最为突出的特点为滑动量大, 滑动分布较为集中, 较大的滑动量主要分布于震源上方, 长约 250 km、宽约 120 km 的范围内, 最大滑动量高达 54 m 左右. 震后 8 h 内的余震多发生在滑动量较小的区域附近. 图 4(b) 给出了标量地震矩释放随时间的变化图, 此次地震的震源破裂过程持续了大约 140 s, 平均破裂传播速度约为 2.1 km s^{-1} , 标量地震矩释放的峰值出现在 40~80 s 之间, 80 s 以后此次地震的绝大部分能量得到了释放. 子断层的滑动角度均以逆冲为主. 反演得到地震矩张量为 $2.8 \times 10^{22} \text{ Nm}$, 换算为矩张量震级约为 $M_w 8.9$ ^[11].

3 讨论

地震发生之后, 美国地质调查局、加州大学圣巴巴拉分校、日本筑波大学、中国地震局地球物理研究

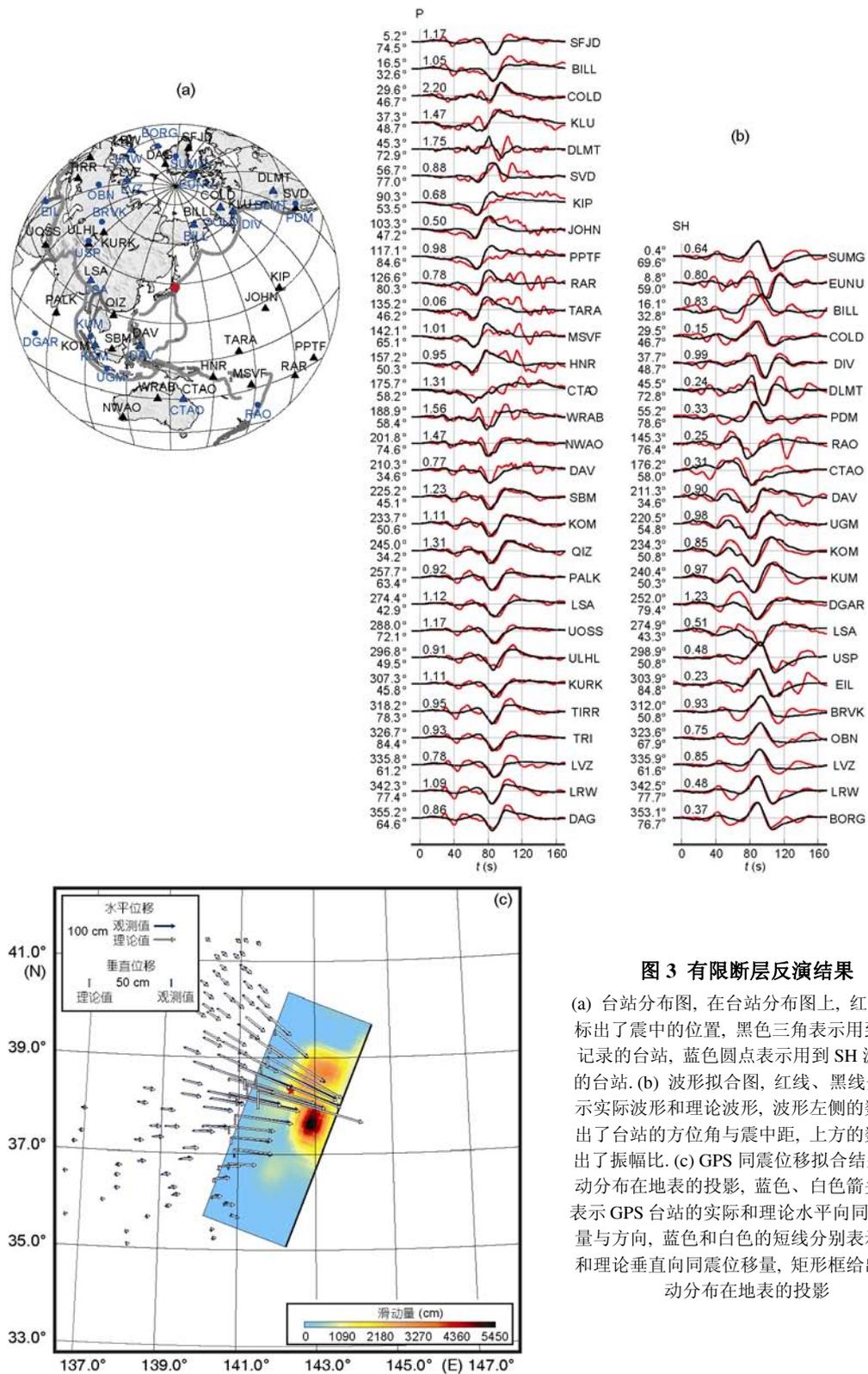


图3 有限断层反演结果

(a) 台站分布图, 在台站分布图上, 红色圆点标出了震中的位置, 黑色三角表示用到 P 波记录的台站, 蓝色圆点表示用到 SH 波记录的台站. (b) 波形拟合图, 红线、黑线分别表示实际波形和理论波形, 波形左侧的数字给出了台站的方位角与震中距, 上方的数字给出了振幅比. (c) GPS 同震位移拟合结果与滑动分布在地表的投影, 蓝色、白色箭头分别表示 GPS 台站的实际和理论水平向同震位移量与方向, 蓝色和白色的短线分别表示实际和理论垂直向同震位移量, 矩形框给出了滑动分布在地表的投影

所、中国地震局地震预测研究所等多家研究机构在第一时间给出了根据有限断层模型得到的震源破裂过

程图像(图5)。这些初步结果之间无论是最大滑动量还是滑动分布都存在较大的差异, 我们仅依据远场波形

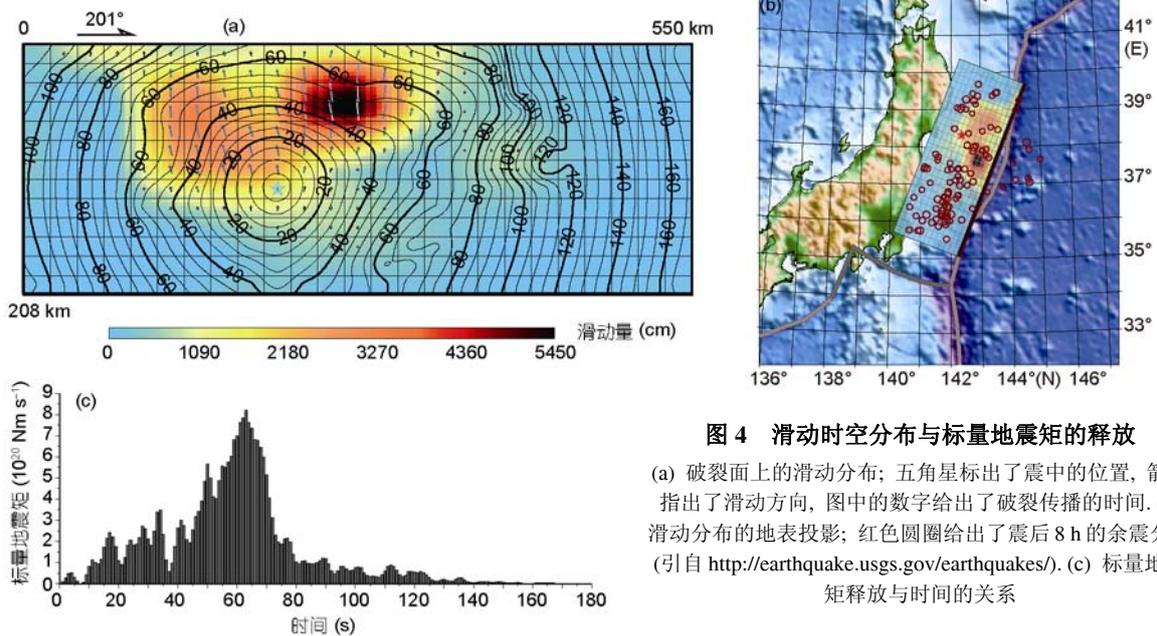


图4 滑动时空分布与标量地震矩的释放

(a) 破裂面上的滑动分布; 五角星标出了震中的位置, 箭头指出了滑动方向, 图中的数字给出了破裂传播的时间. (b) 滑动分布的地表投影; 红色圆圈给出了震后8h的余震分布 (引自 <http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/>). (c) 标量地震矩释放与时间的关系

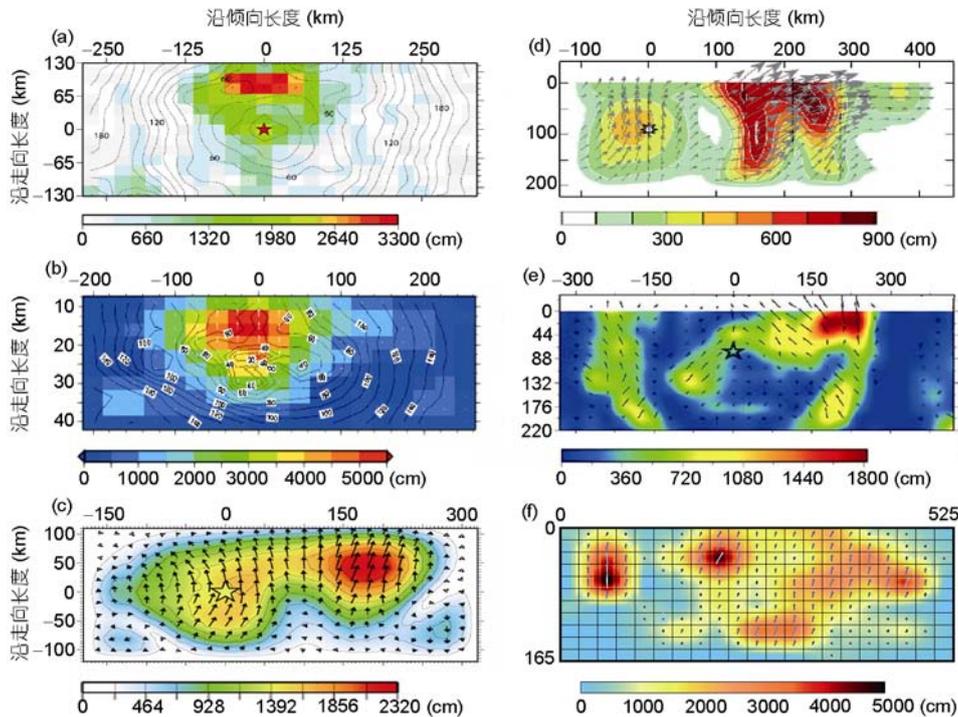


图5 不同研究机构有关震源破裂过程的初步结果

(a) 据美国地质调查局, http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eqinthenews/2011/usc0001xgp/finite_fault.php; (b) 据加州大学圣巴巴拉分校, http://www.geol.ucsb.edu/faculty/ji/big_earthquakes/2011/03/0311/Honshu_main.html; (c) 据日本筑波大学, <http://www.geol.tsukuba.ac.jp/~yagi-y/EQ/Tohoku/>; (d) 据中国地震局地球物理研究所, <http://www.ceic.ac.cn/index.jsp>; (e) 据中国地震局地震预测研究所, <http://www.ceic.ac.cn/index.jsp>; (f) 仅用远场波形的最初结果

得到的最初结果与根据GPS加远场波形联合反演的得到的结果之间也存在一定差异. 其原因可能在于, 首先此次地震两个节面一个接近水平向, 一个接近垂直向, 远场波形的离源角较大, 导致分辨率不佳. 其次不同的研究组选取资料不同, 反演约束不同, 造成了结果的差异. 再次由于反演具有多解性, 且有限断层模型中待反演参数数目较多, 因此造成了最终的反演结果之间有着较大的差异. 可见多种资料的联合反演是十分必要的, GPS同震位移资料的使用, 使得解答在空间分辨率上有了更好的约束, 结果更为可靠.

有关俯冲带的研究认为俯冲带可以分为智利型与马里亚纳型^[2,4]. 智利型俯冲带的特点为岩石圈年龄轻, 密度较轻, 温度较高, 通常会引发大的地震. 而马里亚纳型俯冲带的特点为岩石圈年龄老, 密度较高, 温度较低, 通常在这种俯冲带上只会发生中小级别的地震, 此次地震所在俯冲带即为这种类型. 此次地震的发生改变了认为该区域附近俯冲带不会发生8.0级以上地震的看法^[2,3]. 反演得到破裂过程中的最大滑动量达54 m左右, Suwa等^[12]反演GPS运动速度时, 得到此次地震附近俯冲带上的最大锁定量达10 cm左右. 我们做一种最简单的估算, 滑动量除以锁定量, 可以得到此次地震的能量积累可能已经长

达540年以上.

Otofujii等^[13]提出了一种日本海扩张的“双开门”模式, 即日本岛弧北部逆时针方向旋转, 南部顺时针方向旋转. 在这次地震中, 反演得到的滑动角方向, 向北存在逆时针旋转趋势, 向南存在顺时针旋转趋势. GPS同震位移量中间最大, 向南向北逐渐减少, 同时也表现出了相应的旋转趋势. 运动学特征的相似性反映了日本海的扩张可能仍在进行.

4 小结

基于有限断层模型, 通过远场波形资料以及GPS同震位移资料得到了此次地震震源破裂过程图像. 破裂过程具有滑动量大, 滑动分布集中的特点, 较大的滑动量主要分布于长约250 km、宽约120 km的范围内, 释放了此次地震的绝大部分能量, 最大滑动量高达54 m左右. 滑动角度分布与GPS同震位移表现出与“双开门”扩张模式相似的运动学特征, 反映了日本海的扩张可能仍在继续. 震源机制、反演约束、资料选取以及反演固有的多解性造成不同的震源破裂过程研究结果之间存在加大差异, 因此, 多种资料的联合反演是十分必要的.

致谢 IRIS提供了远场波形资料的下载, JPL和Caltech的ARIA团队、GSI提供了GPS同震位移资料的下载, 张福勤研究员在讨论部分给予了帮助, 在此一并予以感谢.

参考文献

- 1 Taira A. Tectonic evolution of the Japanese Island Arc system. *Annu Rev Earth Planet Sci*, 2001, 29: 109–134
- 2 Monastersky R. Giant shock rattles ideas about quake behaviour. *Nature*, 2011, 471: 274
- 3 Ruff L, Kanamori H. Seismicity and the subduction process. *Phys Earth Planet Inter*, 1980, 23: 240–252
- 4 Stern R J. Subduction zones. *Rev Geophys*, 2002, 40: 1012–1038
- 5 Hartzell S H, Heaton T H. Inversion of strong ground motion and teleseismic waveform data for the fault rupture history of the 1979 Imperial Valley, California, earthquake. *Bull Seismol Soc Amer*, 1983, 73: 1553–1583
- 6 姚振兴, 纪晨. 时间域内有限地震断层的反演问题. *地球物理学报*, 1997, 40: 691–701
- 7 Ji C, Wald D J, Helmberger D V. Source description of the 1999 Hector Mine, California, earthquake, part I: Wavelet domain inversion theory and resolution analysis. *Bull Seismol Soc Amer*, 2002, 92: 1192–1207
- 8 Wang W M, He Y M, Yao Z X. Complexity of the coseismic rupture for 1999 Chi-Chi Earthquake (Taiwan) from inversion of GPS observations. *Tectonophysics*, 2004, 382: 151–172
- 9 纪晨, 姚振兴. 用于地球物理反演的均匀设计优化算法. *地球物理学报*, 1996, 39: 233–242
- 10 ARIA Team at JPL and Caltech. Preliminary GPS Displacement Data. All Original GEONET RINEX data provided to Caltech by the Geospatial Information Authority (GSI) of Japan. 2011. <http://supersites.earthobservations.org/sendai.php>
- 11 Kanamori H. The energy release in great earthquake. *J Geophys Res*, 1977, 82: 2981–2987
- 12 Suwa Y, Miura S, Hasegawa A, et al. Interplate coupling beneath NE Japan inferred from three-dimensional displacement field. *J Geophys Res*, 2006, doi: 10.1029/2004JB003203
- 13 Otofujii Y, Matsuda T, Nohda S. Brief review of Miocene opening of the Japan Sea: Paleomagnetic evidence from the Japan arc. *J Geomag Geoelectr*, 1986, 38: 287–294