

李祥, 万永革, 崔华伟, 黄骥超, 闫睿, 高熹微. 2016. 2015年智利  $M_w 8.3$  地震震源区构造应力场分析. 地震学报, **38**(6): 847-853. doi:10.11939/jass.2016.06.004.  
Li X, Wan Y G, Cui H W, Huang J C, Yan R, Gao X W. 2016. Tectonic stress field analysis on the source region of the 2015  $M_w 8.3$  Chile earthquake. *Acta Seismologica Sinica*, **38**(6): 847-853. doi:10.11939/jass.2016.06.004.

# 2015年智利 $M_w 8.3$ 地震震源区 构造应力场分析<sup>\*</sup>

李 祥 万永革<sup>\*</sup> 崔华伟 黄骥超 闫 睿 高熹微

(中国河北三河 065201 防灾科技学院)

**摘要** 自 GCMT 目录收集 2015 年 9 月 16 日智利  $M_w 8.3$  地震震中周围深度在 70 km 以上的震源机制解, 应用 MSATSI 软件反演了该地震震中周围的应力场. 反演结果显示, 主压应力轴方向的整体一致性较好, 张轴的非均匀性明显, 即大致以  $31.5^\circ\text{S}$  为界, 南部处于 EW 向和 NS 向的双轴压缩状态, 以 WE 向挤压为主, 兼有 NS 向挤压, 拉张轴近乎垂直; 北部压轴方位仍为近 EW 向, 但张轴方位旋转至近 NS 向.

**关键词** 震源机制解 反演 非均匀应力场 智利地震 俯冲带

doi:10.11939/jass.2016.06.004 中图分类号: P315.7<sup>+7</sup> 文献标志码: A

## Tectonic stress field analysis on the source region of the 2015 $M_w 8.3$ Chile earthquake

Li Xiang Wan Yongge<sup>\*</sup> Cui Huawei Huang Jichao Yan Rui Gao Xiwei

(Institute of Disaster Prevention, Hebei Sanhe 065201, China)

**Abstract:** Based on the focal mechanism solutions above depth of 70 km around the  $M_w 8.3$  Chile earthquake on 16 September 2015 collected from GCMT, this paper carries out the inversion for stress field of the source region by using MSATSI software. The inversion results show that the directions of all compressive stress axes are consistent to each other, but extensional stress axes exhibit strong inhomogeneity. Taking the  $31.5^\circ\text{S}$  as boundary, the south part is under approximately biaxial compression with major compression in E-W direction and minor compression in N-S direction, but extensional in U-D direction. Whereas in north part, the compressive axis is still in E-W direction, but the extensional stress axis gradually rotates to N-S direction.

**Key words:** focal mechanism solution; inversion; inhomogeneous stress field; Chile earthquake; subduction zone

\* 基金项目 河北省地震科技星火计划(DZ20140101002)、国家自然科学基金(41674055)和“晋冀蒙交界区临时测震台网建设运行及强震背景跟踪研究”项目(DZ20150428102)共同资助。

收稿日期 2016-01-11 收到初稿, 2016-08-24 决定采用修改稿。  
† 通讯作者 e-mail: wanyg217217@vip.sina.com



## 引言

2015年9月16日22时54分32秒(UTC),智利中北部的伊亚贝尔(Illapel,首都圣地亚哥以北约300 km)以西46 km发生 $M_w$ 8.3地震,震中位置为( $71.654^{\circ}$ W,  $31.570^{\circ}$ S),震源深度为20.7 km (USGS, 2015). 多位研究人员和机构给出了关于该地震的快速研究成果,例如:哈佛大学矩心矩张量目录(GCMT, 2015)快速给出了该地震的震源机制解,即节面I的走向为 $5^{\circ}$ ,倾角为 $22^{\circ}$ ,滑动角为 $106^{\circ}$ ,节面II的走向为 $169^{\circ}$ ,倾角为 $69^{\circ}$ ,滑动角为 $84^{\circ}$ ;张勇等(2015)和Hayes(2015)根据地震波记录分别给出了该地震的破裂分布,其结果均表明这是一次板块边界的逆冲型地震.

截至2015年9月26日24时00分(UTC)共记录到智利 $M_w$ 8.3地震的余震86次,其中 $M_w > 7.0$ 地震1次, $M_w 6.0 - 6.9$ 地震12次, $M_w 5.0 - 5.9$ 地震65次, $M_w 4.0 - 4.9$ 地震8次. 该地震序列发生在南美俯冲带的中南部,南美俯冲带是纳兹卡板块以65 mm/a的速度延NE $96.5^{\circ}$ 方向向南美洲板块西缘俯冲(DeMets *et al*, 1994)所形成的地震活动频繁的汇聚型板块边界. 南美俯冲带和南美洲板块除受到纳兹卡板块俯冲运动的影响外,其东部受到大西洋中脊扩张的挤压,北部受到加勒比板块的动力影响,南部受到南极洲板块NE向的推挤. 这些周围板块的联合作用导致了南美洲板块剧烈而复杂的变形和其西部边缘剧烈的地震活动(Pilger, 1984; 马宗晋等, 1992, 2002, 2006; DeMets *et al*, 1994; 金双根, 朱文耀, 2002; 金双根, 2003; 李智, 2003). 自1900年以来,该俯冲带发生了许多 $M \geq 8$ 地震,并引发了毁灭性的海啸,包括1960年智利南部发生的世界上地震仪器记录到的最大地震( $M_w 9.5$ )以及其它著名的引发海啸的地震,例如,1906年厄瓜多尔埃斯梅拉达(Esmeraldas) $M_w 8.5$ 地震、1922年智利科金博(Coquimbo) $M_w 8.5$ 地震、2001年秘鲁阿雷基帕(Arequipa) $M_w 8.4$ 地震、2007年秘鲁皮斯科(Pisco) $M_w 8.0$ 地震、2010年智利莫尔(Maule) $M_w 8.8$ 地震,因此该区域一直是地震学领域研究的热点.

目前关于南美俯冲带的研究主要涉及以下几方面:采用三维P波走时层析技术(Engdahl *et al*, 1995; Norabuena *et al*, 1994)及地震震源位置的分布(Cahill, Isacks, 1992; 何建坤, 刘福田, 1998; Chen *et al*, 2004; 吕政, 邵喜彬, 2005)对该俯冲带构造形态的研究;利用GPS数据对南美洲板块及其周围板块的运动和变形的研究(Demets *et al*, 1994; 金双根, 朱文耀, 2002; 金双根, 2003; 李智, 2003). 在采用震源机制解对该地区动力学的研究方面已经取得了较多的成果. Araujo 和 Suárez(1994)的研究表明南美俯冲带的构造形态与震源机制解张轴倾伏角显著相关,Chen等(2004)通过对震源机制解张轴和压轴的分区统计,粗略地分析了该地区的应力状态,但其所求应力场的分辨率较低,不足以认为南美俯冲带应力场的非均匀性及其动力学特征提供较为精细的基础资料.

本文拟对2015年智利地震震源区进行较精细的应力场反演,并对该地区的应力场非均匀性和动力学特征予以分析,以期为该区域地震活动性研究提供背景资料.

## 1 反演方法和资料

### 1.1 反演方法

应力场反演结果因应力分区方法不同,所得到的应力场特征可能不同(Hardebeck, Hauksson, 1999; Townend, Zoback, 2001). 本文采用Hardebeck和Michael(2006)的方

法, 使用 Martínez-Garzón 等(2014)的程序计算智利地震震源区的构造应力场。该方法以采用 Bootstrap 估计参数误差的线性应力反演方法(Michael, 1987)为基础, 对可假定为均匀应力场的区域进行反演, 增加了对空间(或时间)上不同应力场方向的求解, 在空间(或时间)的平滑约束方面避免了离群点对结果的影响; 其具体做法是将研究区域分为多个计算网格, 假定每个网格内的应力均匀, 相邻网格点之间的应力场参数相差不大, 同时增加对空间应力场的平滑约束而得到应力场的空间分布。

参考 Hardebeck 和 Michael(2004)一文, 根据构造特征选择分区, 沿南美俯冲带大致走向以  $0.5^\circ \times 0.5^\circ$  网格将研究区域划分为 25 个应力单元格。反演中应力场方向的不确定性则通过对全部数据进行 2000 次抽样(Hardebeck, Michael, 2006), 重采样次数过少会导致结果的可信度较低, 次数过多又会导致计算量大, 计算时间冗长。鉴于计算中默认的重采样次数为 1000—5000(Martínez-Garzón *et al.*, 2014), 本文采用一个折中的次数, 设定为 2000 次, 置信度设为 95%。经计算得到每个网格内的应力方向和应力形因子  $R$  值的分布。应力形因子  $R$  值可以表现出中等主应力的相对大小(Gephart, Forsyth, 1984), 一般用于表示应力的空间形态(万永革等, 2011; Wan *et al.*, 2016; 黄骥超等, 2016), 定义为

$$R = \frac{S_2 - S_1}{S_3 - S_1}, \quad (1)$$

式中,  $S_1$ ,  $S_2$  和  $S_3$  分别为主压应力、中间主应力和主张应力。当  $R$  值接近于 1.0 时, 表示主张应力( $S_3$ )与中间主应力( $S_2$ )大小接近, 即中间主应力也表现出一定的拉张成分, 处于双轴拉张状态; 当  $R$  值接近于 0 时, 表示主压应力( $S_1$ )与中间主应力( $S_2$ )大小接近, 处于双轴压缩状态(Guiraud *et al.*, 1989; 万永革等, 2011; Wan *et al.*, 2016)。

## 1.2 资料

自 GCMT 目录选取智利  $M_w$  8.3 地震震源区及周围( $73^\circ\text{W}$ — $70^\circ\text{W}$ ,  $33^\circ\text{S}$ — $29^\circ\text{S}$ )深度为 70 km 以上的地震震源机制解数据, 将其作为反演应力场的基础资料。由于本文主要针对震源周围板块边界附近的构造应力场进行反演, 故剔除了区域中远离板块边界位于南美大陆和纳兹卡板块内的 7 个地震震源机制解, 最后得到统一格式的地震震源机制解 168 个, 如图 1a 所示。可以看出, 智利地震周围的地震活动沿南美俯冲带走向集中分布于板块交界, 按 Zoback(1992)的地震分类方式将其分类, 其中逆断和逆断兼走滑型地震 138 次, 正断和正断兼走滑型地震 7 次, 走滑型地震 2 次, 过渡型地震 21 次, 分别占地震总数的 82.0%, 4.0%, 1.0% 和 13.0%。智利  $M_w$  8.3 地震的类型与区域内多数地震相同, 为逆冲型地震。

## 2 反演结果

采用上述反演方法和设定参数反演得到应力场方向的平面分布(图 1b)和应力形因子  $R$  值的分布(图 2b)。可以看出: 整个区域应力场表现为纳兹卡板块与南美洲板块的碰撞所导致的 EW 向主压应力为主的状态; 南部应力场的张轴取向较为稳定; 北部应力场则表现为误差较大的主张应力方向, 且  $R$  值较大。

为分析均匀网格划分反演所得到的应力场与整体平均应力场的差异, 本文对研究区域的所有震源机制解进行反演, 得到平均应力场方向和应力形因子, 如图 2 所示。图中平均应力场的优势方向用红色箭头表示。可以看出: 主压应力轴方位呈近 EW 向( $N91^\circ\text{E}$ ), 倾

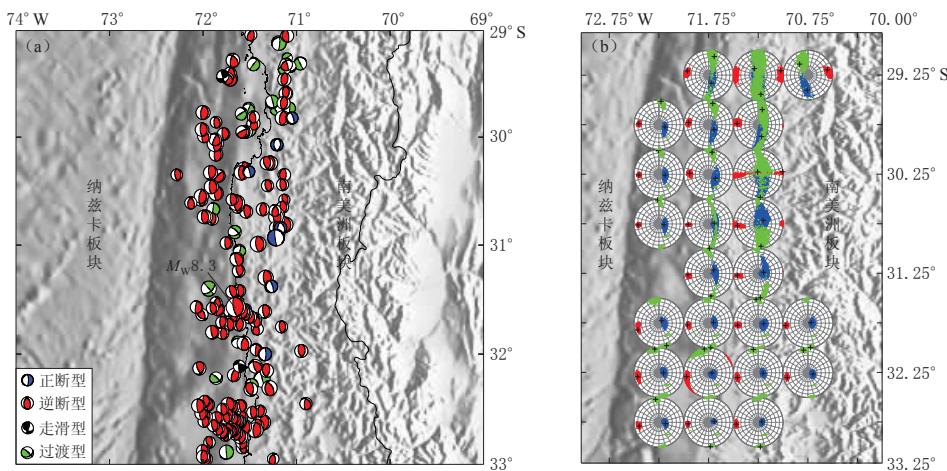


图 1 本文所用震源机制解的分布(a)与反演所得到的应力场方向(b)

震源机制解和反演的应力轴方向均采用下半球等面积投影表示. 黑色十字表示  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$ ,  $\sigma_3$  的最优应力轴方向, 其周围的红点、绿点和蓝点给出了 95% 置信度下对应轴的置信范围

Fig. 1 Distribution of the focal mechanism solutions (a) and the stress field orientation inverted in this study (b)

The focal mechanism data and stress direction are presented by lower-hemisphere equal-area projection. The black crosses show the optimal stress directions of  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$ ,  $\sigma_3$ , and the red, green and blue points around them show the confidence range of the corresponding stress axes with confidence level of 95%

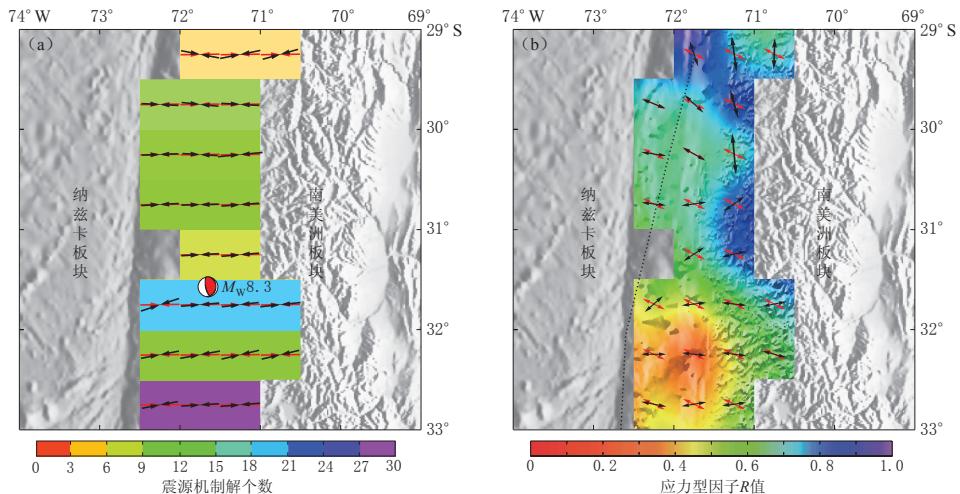


图 2 主压应力  $\sigma_1$  轴方位(a)以及主张应力  $\sigma_3$  轴方位和应力形因子  $R$  值(b)分布图

黑色箭头表示划分网格反演结果, 红色箭头表示平均应力场结果; 虚线表示板块边界

Fig. 2 The distribution of the azimuth of  $\sigma_1$  (a) and  $\sigma_3$  axes and the  $R$  value (b)

The black arrows represent the compressive and extensional axes of the stress field in subarea, and the red ones represent the compressive and extensional axes of the mean stress field. The dotted line presents the plate boundary

伏角为  $14^\circ$ , 主张应力轴为 WNW-ESE(方位为  $116^\circ$ ), 倾伏角为  $74^\circ$ , 这与该地区受到纳兹卡板块东向推挤所导致的应力场方向一致. 整个区域反演的  $R$  值为 0.77, 表明中间应力轴具有一定的拉张成分, 与主张应力轴方向区分不明显. 由图 2 还可看出, 该区域的主张应

力轴和中间应力轴有可能出现一定的非均匀性,下面将分区进行研究。

区域划分单元网格反演的应力场最优方向如图2中黑色箭头所示,主压应力轴与整体反演结果差别不大,相对于平均应力场的主压应力轴走向,研究区域南部和北端发生了轻微偏转,但最大方位偏转小于 $18^\circ$ ,倾伏角的偏转范围小于 $13^\circ$ ,表明该区域的主压应力方向相对稳定。该区域处于纳兹卡板块与南美洲板块碰撞俯冲的动力学背景下,主压应力方向的稳定性反映了区域的应力环境。由图1b和2b可以看出,主张应力轴倾伏角和方位角的非均匀性特征明显:南部主张应力轴近乎垂直,而在北部远离板块边界处偏转为近乎水平的NS向(在图2b中表现为箭头变长),方位角最大偏转为 $68^\circ$ ,倾伏角最大偏转为 $66^\circ$ (相对于平均应力场方向);分区域的R值与整体反演的R值相差较大,总体趋势表现为南低北高,西低东高(图2b)。

研究区的总体应力场为EW向挤压,反映了该地区纳兹卡板块和南美洲板块的碰撞作用,但在这种总体EW向挤压的背景下,必定存在一定的非均匀性,下面以 $31.5^\circ\text{S}$ 为界将研究区分为南北两部分,分别讨论其非均匀特性。

$31.5^\circ\text{S}$ 以南区域,基于均匀网格反演得到的压轴方位较平均应力场反演的结果向ENE向偏转,张轴倾伏角普遍较大,处于近垂直状态。应力形因子R值普遍小于0.5,说明该区域近NS向的 $\sigma_2$ 有一定的挤压成分。这种近NS向和近EW向的挤压情况类似于万永革(2015)使用擦痕数据求解的乌鲁木齐市区应力场,只不过乌鲁木齐应力场是以NS向挤压为主、EW向挤压为辅的应力状态。而对于 $31.5^\circ\text{S}$ 以北区域,其主压应力轴方位逐渐向纳兹卡板块的俯冲方向(近EW向)旋转,与整体反演结果基本一致,即主压应力轴逐渐顺时针回转至EW方向;张轴倾伏角和方位变化较大,由S向N,距板块边界由近到远,方位逐渐向NS向偏转,倾伏角逐渐较小。在研究区域北端 $29.5^\circ\text{S}$ 近板块边界处,主压应力轴方位回转至俯冲方向,但是在远离板块边界处压轴却逆时针旋转至ENE向,这与Araujo和Suárez(1994)对南美俯冲带的研究结果相同,即在 $29.0^\circ\text{S}$ 以北区域主压应力轴方位在近板块边界处与俯冲方向接近,在远板块边界处俯冲方向发生北向偏转。该区域应力形因子R值普遍大于0.5,表明该区域 $\sigma_2$ 有一定的拉张成分,在应力场反演结果中表现为张轴倾伏角的减小。

### 3 讨论与结论

本文选取智利  $M_w 8.3$  地震周围近年来 70 km 深度以上的震源机制解资料,分别以均匀网格和整体两种方式反演了地壳应力场,更好地表现了区域应力场的非均匀性。

区域整体反演得到的平均应力场方向和划分单元网格反演得到的应力场结果与纳兹卡板块俯冲方向基本一致,表明区域应力场方向受到纳兹卡板块对南美洲板块西缘俯冲挤压的控制,其中: $31.5^\circ\text{S}$ 以北区域的主压应力轴与整体主压应力轴方向一致性较好,主张应力轴呈近NS向且倾伏角与 $31.5^\circ\text{S}$ 以南区域相比较小,具有较大的应力形因子;而 $31.5^\circ\text{S}$ 以南区域具有较小的应力形因子,呈现近EW向和近NS向挤压、垂直向拉张的双轴压缩应力状态。

对于上述反演结果尚存在诸多问题需要解决,如研究区域南部的NS向挤压力来自何处,北部的双轴拉张的状态如何解释。这方面还需要利用更加精细的层析成像、GPS形变观测等地球物理手段进行进一步研究。本文只是根据目前的震源机制解结果给出了应力场

的基本特征。随着观测资料的进一步积累以及地壳形变、地震层析成像等地球科学的研究的相互验证，对该地区的地球动力学过程会有更为清楚的认识。

就智利地震来看，其震源机制解属逆冲型地震，其震源机制解参数与附近应力场反演结果接近，震源区周围的  $R$  值普遍大于 0.5，说明该地震发生在压应力为主的俯冲带构造背景应力场下。若该地震发生在研究区南部，则震源机制解的  $T$  轴更容易偏向垂直， $P$  轴以 EW 向为主，但又有一定的 NS 向分量；若地震发生在研究区域北部，则  $T$  轴逐渐偏向 NS 向，有可能出现过渡型、走滑型甚至正断型震源机制解。

## 参 考 文 献

- 何建坤, 刘福田. 1998. 俯冲板片形貌特征和活动大陆边缘演化体制的关系[J]. 地球物理学进展, **13**(2): 15–25.
- He J K, Liu F T. 1998. Relationship between the morphology of subducted slabs and the tectonic evolution in the active continental margins[J]. *Progress in Geophysics*, **13**(2): 15–25 (in Chinese).
- 黄骥超, 万永革, 盛书中, 李祥. 2016. 汤加—克马德克俯冲带现今非均匀应力场特征及其动力学意义[J]. 地球物理学报, **59**(2): 578–592. doi:10.6038/cjg20160216.
- Huang J C, Wan Y G, Sheng S Z, Li X. 2016. Heterogeneity of present-day stress field in Tonga-Kermadec subduction zone and its geodynamic significance[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **59**(2): 578–592 (in Chinese).
- 黄骥超, 万永革. 2015. 利用小震与强震震源机制解反演首都圈现今构造应力场[J]. 地震, **35**(1): 17–27.
- Huang J C, Wan Y G. 2015. Present tectonic stress field in the capital region of China determined from small and strong earthquake focal mechanisms[J]. *Earthquake*, **35**(1): 17–27 (in Chinese).
- 金双根, 朱文耀. 2002. 南美板块的运动和活动形变[J]. 武汉大学学报: 信息科学版, **27**(4): 358–362.
- Jin S G, Zhu W Y. 2002. Motion and active deformation of South America Plate[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, **27**(4): 358–362 (in Chinese).
- 金双根. 2003. GPS 监测全球板块构造运动的研究[D]. 上海: 中国科学院研究生院上海天文台: 87–92.
- Jin S G. 2003. *Global Plate Tectonic Motion From GPS Measurements*[D]. Shanghai: Shanghai Observatory, Chinese Academy of Sciences: 87–92 (in Chinese).
- 李智. 2003. 利用空间对地观测技术研究全球构造特征[D]. 北京: 中国地震局地质研究所: 76–100.
- Li Z. 2003. *Global Tectonics Characteristics Inferred From Space Geodesy*[D]. Beijing: Institute of Geology, China Earthquake Administration: 76–100 (in Chinese).
- 吕政, 邵喜彬. 2004. 全球俯冲带形态特征研究[J]. 东北地震研究, **20**(3): 17–25.
- Lü Z, Shao X B. 2004. Research on the diving plate shape characteristic of global diving belt[J]. *Seismological Research of Northeast China*, **20**(3): 17–25 (in Chinese).
- 马宗晋, 高祥林, 任金卫. 1992. 现今全球构造特征及其动力学解释[J]. 第四纪研究, **12**(4): 293–305.
- Ma Z J, Gao X L, Ren J W. 1992. The features of contemporary global tectonics and its dynamic explanation[J]. *Quaternary Sciences*, **12**(4): 293–305 (in Chinese).
- 马宗晋, 宋晓东, 杜品仁, 傅容珊, 孙付平, 汪洋. 2002. 地球南北半球的非对称性[J]. 地球物理学报, **45**(1): 26–33.
- Ma Z J, Song X D, Du P R, Fu R S, Sun F P, Wang Y. 2002. Asymmetry between the southern and northern hemispheres of the earth[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **45**(1): 26–33 (in Chinese).
- 马宗晋, 张进, 任金卫, 李智. 2006. 全球 GPS 矢量场的分区描述及规律性分析[J]. 地质学报, **80**(8): 1089–1100.
- Ma Z J, Zhang J, Ren J W, Li Z. 2006. Sub-regional descriptions of global GPS vector field and its geodynamic significance[J]. *Acta Geologica Sinica*, **80**(8): 1089–1100 (in Chinese).
- 万永革. 2015. 联合采用定性和定量断层资料的应力张量反演方法及在乌鲁木齐地区的应用[J]. 地球物理学报, **58**(9): 3144–3156.
- Wan Y G. 2015. A grid search method for determination of tectonic stress tensor using qualitative and quantitative data of active faults and its application to the Urumqi area[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **58**(9): 3144–3156 (in Chinese).
- 万永革, 盛书中, 许雅儒, 吴逸民. 2011. 不同应力状态和摩擦系数对综合 P 波辐射花样影响的模拟研究[J]. 地球物理

- 学报, **54**(4): 994–1001.
- Wan Y G, Sheng S Z, Xu Y R, Wu Y M. 2011. Effect of stress ratio and friction coefficient on composite P wave radiation patterns[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **54**(4): 994–1001 (in Chinese).
- 张勇, 许力生, 陈运泰. 2015. 2015年9月17日智利中部沿岸近海  $M_s$  8.2 地震[EB/OL]. [2015-09-18]. <http://www.cea-igp.ac.cn/tpxw/272851.shtml>.
- Zhang Y, Xu L S, Chen Y T. 2015. Off coast  $M_s$  8.2 earthquake in central Chile on Sep. 19, 2015 [EB/OL]. [2015-09-18]. <http://www.cea-igp.ac.cn/tpxw/272851.shtml> (in Chinese).
- Araujo M, Suárez G. 1994. Geometry and state of stress of the subducted Nazca Plate beneath central Chile and Argentina: Evidence from teleseismic data[J]. *Geophys J Int*, **116**(2): 283–303.
- Cahill T, Isacks B L. 1992. Seismicity and shape of the subducted Nazca Plate[J]. *J Geophys Res*, **97**(B12): 17503–17529.
- Chen P F, Bina C R, Okal E A. 2004. A global survey of stress orientations in subducting slabs as revealed by intermediate-depth earthquakes[J]. *Geophys J Int*, **159**(2): 721–733.
- DeMets C, Gordon R G, Argus D F, Stein S. 1994. Effect of recent revisions to the geomagnetic reversal time scale on estimates of current plate motions[J]. *Geophys Res Lett*, **21**(20): 2191–2194.
- Engdahl E R, van der Hilst R D, Berrocal J. 1995. Imaging of subducted lithosphere beneath South America[J]. *Geophys Res Lett*, **22**(16): 2317–2320.
- GCMT. 2015. Global CMT web page[EB/OL]. [2015-09-20]. <http://www.globalcmt.org/CMTsearch.html>.
- Gephart J W, Forsyth D W. 1984. An improved method for determining the regional stress tensor using earthquake focal mechanism data: Application to the San Fernando earthquake sequence[J]. *J Geophys Res*, **89**(B11): 9305–9320.
- Guiraud M, Laborde O, Philip H. 1989. Characterization of various types of deformation and their corresponding deviatoric stress tensors using microfault analysis[J]. *Tectonophysics*, **170**(3/4): 289–316.
- Hardebeck J L, Hauksson E. 1999. Role of fluids in faulting inferred from stress field signatures[J]. *Science*, **285**(5425): 236–239.
- Hardebeck J L, Michael A J. 2004. Stress orientations at intermediate angles to the San Andreas fault, California[J]. *J Geophys Res*, **109**: B11303. doi:10.1029/2004JB003239.
- Hardebeck J L, Micheal A J. 2006. Damped regional-scale stress inversions: Methodology and examples for southern California and the Coalinga aftershock sequence[J]. *J Geophys Res*, **111**: B11310. doi:10.1029/2005JB004144.
- Hayes G. 2015. Preliminary finite fault results for the Sep 16, 2015  $M_w$  8.3 46 km W of Illapel, Chile earthquake (Version 1)[EB/OL]. [2015-09-20]. [http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/us20003k7a#scientific\\_finitefault](http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/us20003k7a#scientific_finitefault).
- Martinez-Garzón P, Kwiatek G, Ickrath M, Bohnhoff M. 2014. MSATSI: A MATLAB package for stress inversion combining solid classic methodology, a new simplified user-handling, and a visualization tool[J]. *Seis Res Lett*, **85**(4): 896–904.
- Michael A J. 1987. Use of focal mechanisms to determine stress: A control study[J]. *J Geophys Res*, **92**(B1): 357–368.
- Norabuena E O, Snook J A, James D E. 1994. Structure of the subducting Nazca Plate beneath Peru[J]. *J Geophys Res*, **99**(B5): 9215–9226.
- Pilger R H. 1984. Cenozoic plate kinematics, subduction and magmatism: South American Andes[J]. *J Geol Soc*, **141**(5): 793–802.
- Townend J, Zoback M D. 2001. Implications of earthquake focal mechanisms for the frictional strength of the San Andreas fault system[J]. *Geological Society of London Special Publications*, **186**(1): 13–21.
- USGS. 2015.  $M_w$  8.3; 48 km W of Illapel, Chile[EB/OL]. [2015-09-23]. <http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/us20003k7a#executive>.
- Wan Y G, Sheng S Z, Huang J C, Li X, Chen X. 2016. The grid search algorithm of tectonic stress tensor based on focal mechanism data and its application in the boundary zone of China, Vietnam and Laos[J]. *J Earth Sci*, **27**(5): 777–785. doi:10.1007/s12583-015-0649-1.
- Zoback M L. 1992. First- and second-order patterns of stress in the lithosphere: The World Stress Map Project[J]. *J Geophys Res*, **97**(B8): 11703–11728.