

doi:10.16738/j.cnki.issn.1003-3238.2015Z1006

利用 P 波质点运动估计“中国数字地震观测网络”地震计方位角

Fenglin Niu Juan Li

摘要 新近建成的中国地震台阵(CEArray)由中国国家数字地震台网(CNDSN)、31个区域地震台网以及几个小孔径台阵构成,台站总数逾千,其中宽频带台站850多个。这一巨大台阵的建成为日常的地震活动监测及窥探地球内部结构提供了前所未有的契机。许多现代地震学研究都要进行垂向和水平分量的旋转,用以分离不同类型的地震波。因此两个水平分量的方位信息构成了正确旋转的关键。我们分析了CEArray台阵记录到的远场P波质点运动,并用以估测每个台站的BHN分量方位角。我们提出了一种基于信噪比的多事件方法来获取最佳方位角,可以很好地解释台站记录的P波质点运动特征。该方法可以给出方位角的稳健估值,包括基于背景噪声水平的误差。我们发现近1/3台站存在不同程度的方位角相关问题,包括水平分量方位角偏差、分量命名错误、以及单个或多个分量的极性反转等。这些问题在基于旋转的地震学分析中必须要慎重考虑。

关键词 P波质点运动 后方位角 分量方位 中国地震台阵(CEArray)

0 引言

为了更好地监测中国大陆地区地震活动性,中国地震局[即原“国家地震局”(CEA)]从上世纪90年代末,逐步开始更新并扩展对国家及区域数字地震观测网络的建设(Chen *et al.*, 2006)。2007年上半年正式建成后,CEArray成为目前世界上最大的固定地震网络,由作为“基柱”的中国国家数字地震台网、31个区域地震台网以及一些小口径台阵构成;数量逾千台,其中宽频带台站850多个(Zheng *et al.*, 2009)。这1000多个台站形成了东西展布6700km,南北纵深3500km的大口径二维地震观测网络。后文中我们将统称这些台站为CE-Array。台站间距随台站位置变化较大,在

东中部地区可以达到20~100km(图1)。CEArray的建成和运作不仅在加强地震活动性监测、构筑大震破裂过程细节、提供地震早期预警、地震危险性评估及减轻地震灾害等方面意义重大,同时也打开了一扇直接窥探地球内部的“窗口”(Wang and Niu, 2010),为认识地球已然经历和正在经历的基本过程提供了前所未有的契机。

现代地震学研究强烈依赖精确的三分量宽频带观测。如地震波到时、三维质点运动也是地震记录图中提供的重要信息。它构成诸多分析的基础,如剪切波分裂、接收函数、面波及自由震荡研究等。通常将三分量地动记录旋转至纵向、径向以及横向运动。极性旋转的关键是要保证两个水平分量(通常称为BHN和BHE分量)地理指向的准确。现代高精度仪器制造水平完全可以在 1°

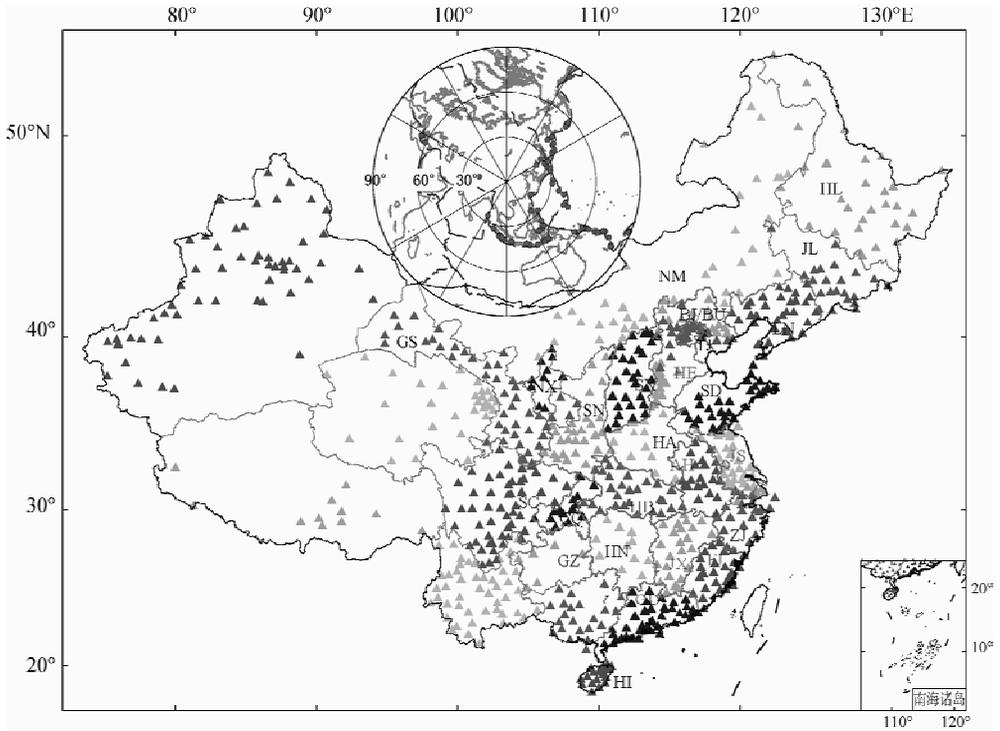


图 1 CEArray 台站分布图。这里没有区分国家或区域地震观测网络。图中的字母代表区域台网代码。插图给出了研究中用到的 106 个远场事件分布(原图为彩色图——译注)

精度范围内保证各分量之间的正交性，因此真正影响极性旋转的因素为 BHN 分量的方向，它完全有可能偏离真实的北向。

将地震仪严格摆放在北向上即便对于野外经验十足的地震学家来说也并非易事。诸多因素都可以导致布台过程中仪器方位的偏差。因此，准确估计仪器方位并诊断存在方位偏差的台站，对于现代地震台网的正常运转显得十分重要。Laske(1995)通过对长周期面波极性分析，发现在研究的 37 个 GEOSCOPE/IDA 台站中，4 个台站存在方位偏差。Schulte-Pelkum 等(2001)对 1976~1999 年间全球地震台网(GSN)台站长周期 P 波分析表明，至少 10 个台站方位角偏差大于 10°。美国数字地震台网的 TA (Transportable Array) 台阵可能是当今世界上台站布设质量最佳的台网之一。在地震仪布设过程中，不是采用指南针，而是采用干

涉光纤陀螺仪指示仪器的北向。即便如此，Ekstrom 和 Busby(2008)对面波极性的分析也揭示出约有 7.4% 的 TA 台站方位偏差大于 7°。

2007 年 7 月起，CEArray 记录的连续波形数据源源不断产出，并在中国地震局数据备份中心(DBC)进行备份。这些数据已逐渐被国内外地震研究团体所使用。由于 CE-Array 是国家台网和区域台网的集结体，地震和火山监测网络由 7 种以上型号的地震计及数字采集器构成，因此在数据广泛使用前，对波形数据的有效性，包括水平分量方位，不同分量、不同类型地震计的仪器响应进行评估就成为当务之急。本研究中，我们通过对 CEArray 一年的远场波形记录中等频率(10s)的 P 波极性分析，获得了总计 803 个宽频带地震仪的水平分量方位角估值。我们发现 270 个台站或存在方位角大于

表1 研究中用到的地震事件信息

| 事件标识 | 纬度/°N | 经度/°E | 深度/ km | M_w | 事件标识 | 纬度/°N | 经度/°E | 深度/ km | M_w |
|------------------|---------|----------|-----------|-------|------------------|---------|----------|-----------|-------|
| 2008-07-01 17:08 | -15.595 | 167.680 | 120 | 7.2 | 2001-08-30 12:48 | -0.169 | 125.083 | 70 | 5.5 |
| 2008-07-02 03:21 | 51.307 | -179.971 | 21 | 6.7 | 2002-08-01 12:10 | -21.495 | -179.352 | 604 | 6.0 |
| 2008-07-08 17:04 | -5.926 | 107.681 | 291 | 6.1 | 2002-08-07 20:58 | -7.582 | 116.819 | 321 | 5.7 |
| 2008-07-08 17:05 | -5.859 | 107.419 | 280 | 7.5 | 2002-08-14 10:09 | 36.501 | 21.670 | 29 | 6.9 |
| 2008-07-11 18:04 | -22.264 | -179.493 | 606 | 5.6 | 2002-08-14 12:08 | 36.345 | 21.863 | 28 | 6.5 |
| 2008-07-16 08:39 | -9.830 | 159.467 | 10 | 6.4 | 2002-08-20 08:08 | 2.768 | 95.964 | 26 | 7.4 |
| 2008-07-22 07:26 | 42.020 | 140.638 | 123 | 5.4 | 2002-08-24 14:46 | -2.405 | 99.931 | 22 | 6.5 |
| 2008-07-23 11:34 | -19.925 | -177.718 | 553 | 5.1 | 2002-08-25 08:36 | -2.486 | 99.972 | 25 | 7.2 |
| 2008-07-26 12:37 | -17.457 | -174.335 | 127 | 6.1 | 2002-08-25 18:06 | -2.332 | 99.891 | 25 | 6.6 |
| 2008-07-28 01:16 | 49.690 | 154.290 | 115 | 5.6 | 2002-08-25 21:02 | -2.245 | 99.808 | 25 | 6.7 |
| 2009-07-02 01:05 | -11.610 | 165.762 | 35 | 7.2 | 2003-08-01 18:51 | 53.886 | 159.295 | 112 | 5.4 |
| 2009-07-03 16:14 | 45.836 | 150.060 | 94 | 6.2 | 2003-08-03 09:31 | 46.406 | 153.175 | 10 | 6.5 |
| 2009-07-06 17:51 | 24.340 | 122.219 | 53 | 6.2 | 2003-08-03 14:11 | 13.351 | 125.630 | 24 | 6.9 |
| 2009-07-12 11:10 | -4.438 | 101.367 | 34 | 8.4 | 2003-08-06 01:21 | 2.572 | 128.231 | 125 | 5.8 |
| 2009-07-12 23:49 | -2.625 | 100.841 | 35 | 7.9 | 2003-08-20 14:10 | 6.178 | 126.930 | 82 | 6.1 |
| 2009-07-13 02:30 | -1.689 | 99.668 | 28 | 5.9 | 2003-08-20 22:32 | 35.490 | 81.467 | 10 | 7.2 |
| 2009-07-13 03:35 | -2.130 | 99.627 | 22 | 7.0 | 2003-08-22 21:24 | 52.176 | -178.716 | 132 | 6.2 |
| 2009-07-13 16:09 | -3.158 | 101.533 | 48 | 6.0 | 2003-08-26 20:06 | 13.594 | 144.879 | 70 | 5.6 |
| 2009-07-14 11:51 | -23.645 | 179.680 | 552 | 5.4 | 2004-08-02 08:48 | -4.346 | 102.717 | 67 | 5.7 |
| 2009-07-20 08:31 | -1.999 | 100.141 | 30 | 6.7 | 2004-08-09 12:46 | -20.071 | 168.892 | 33 | 7.3 |
| 2009-07-25 05:16 | -30.965 | 179.998 | 416 | 6.2 | 2004-08-12 00:30 | -55.664 | 158.453 | 16 | 7.1 |
| 2009-07-26 12:36 | -4.990 | 153.500 | 40 | 6.7 | 2004-08-16 05:54 | 51.878 | -179.165 | 13 | 6.6 |
| 2009-07-28 01:35 | -21.133 | 169.373 | 10 | 6.5 | 2004-08-16 19:19 | 39.028 | 140.005 | 166 | 5.8 |
| 2009-07-28 13:38 | 22.004 | 142.651 | 276 | 7.4 | 2004-08-18 20:39 | -17.342 | -179.022 | 553 | 6.3 |
| 2009-07-30 02:08 | 10.454 | 145.718 | 14 | 6.9 | 2004-08-29 19:10 | -6.108 | 127.484 | 404 | 5.9 |
| 2009-07-30 05:23 | -49.271 | 164.115 | 10 | 7.4 | 2005-08-02 01:33 | 51.864 | -177.528 | 14 | 6.6 |
| 2009-07-30 09:47 | -49.138 | 164.110 | 18 | 6.6 | 2005-08-03 03:53 | -3.015 | 101.319 | 50 | 5.3 |
| 2010-07-05 07:17 | -25.189 | 179.459 | 509 | 6.5 | 2005-08-07 16:45 | 36.164 | 141.526 | 27 | 6.9 |
| 2010-07-15 12:29 | -44.785 | 167.583 | 25 | 6.8 | 2005-08-09 21:51 | 12.516 | 143.181 | 76 | 6.7 |
| 2010-07-16 21:05 | -25.775 | 179.530 | 509 | 6.6 | 2005-08-19 10:08 | 42.503 | 131.872 | 513 | 5.7 |

表 1 (续)

| 事件标识 | 纬度/°N | 经度/°E | 深度/ km | M_w | 事件标识 | 纬度/°N | 经度/°E | 深度/ km | M_w |
|------------------|---------|----------|-----------|-------|------------------|---------|----------|-----------|-------|
| 2010-07-24 21:02 | -3.896 | 101.017 | 20 | 6.8 | 2005-08-23 03:33 | 51.638 | 177.916 | 55 | 5.3 |
| 2010-07-25 03:44 | -6.317 | 154.827 | 54 | 5.6 | 2005-08-23 22:50 | -7.061 | 129.483 | 125 | 5.7 |
| 2010-07-31 03:30 | 18.896 | 145.363 | 223 | 7.2 | 2006-08-03 16:20 | -10.509 | 161.273 | 84 | 6.2 |
| 2011-07-14 04:29 | 1.485 | 127.038 | 105 | 5.3 | 2006-08-04 17:03 | 41.534 | 139.048 | 212 | 5.7 |
| 2011-07-19 00:52 | -21.185 | -178.752 | 558 | 6.3 | 2006-08-06 13:42 | -7.495 | 127.885 | 122 | 6.0 |
| 2011-07-20 12:52 | -6.905 | 155.711 | 52 | 6.0 | 2006-08-15 01:13 | -17.735 | -179.733 | 611 | 5.9 |
| 2011-07-22 08:48 | -5.756 | 147.103 | 53 | 6.7 | 2006-08-19 00:36 | -4.932 | 151.754 | 143 | 5.5 |
| 2011-07-23 01:26 | -4.630 | 151.869 | 150 | 5.9 | 2006-08-25 23:37 | 41.937 | 142.486 | 55 | 5.5 |
| 2011-07-25 02:51 | -2.808 | 101.162 | 55 | 5.9 | 2006-08-27 11:40 | 11.005 | 91.824 | 17 | 6.6 |
| 2011-07-25 16:02 | -8.258 | 118.343 | 52 | 6.5 | 2006-08-29 20:53 | 45.161 | 137.422 | 287 | 6.0 |
| 2011-07-25 19:53 | -8.214 | 118.430 | 35 | 6.5 | 2007-08-03 03:02 | -23.370 | -179.778 | 581 | 6.2 |
| 2011-07-27 11:49 | -10.990 | 162.225 | 16 | 6.6 | 2007-08-05 02:12 | 53.882 | 152.886 | 632 | 7.7 |
| 2012-07-07 00:47 | 29.916 | 141.045 | 78 | 5.9 | 2007-08-07 04:44 | -16.428 | -174.047 | 116 | 5.5 |
| 2012-07-09 07:28 | -26.057 | -177.518 | 143 | 7.8 | 2007-08-09 08:24 | -20.919 | 168.769 | 39 | 5.4 |
| 2012-07-15 08:03 | -7.522 | 127.482 | 147 | 6.0 | 2007-08-15 03:26 | 35.800 | 27.860 | 52 | 6.4 |
| 2012-07-15 09:39 | -6.623 | 131.173 | 14 | 6.4 | 2007-08-19 02:39 | 37.552 | 142.214 | 22 | 7.0 |
| 2012-07-19 09:30 | 51.367 | -179.549 | 29 | 7.1 | 2007-08-19 09:27 | -11.041 | 164.493 | 11 | 6.6 |
| 2012-07-19 14:51 | 51.275 | -179.528 | 35 | 5.3 | 2007-08-19 22:39 | -17.337 | -177.312 | 391 | 6.4 |
| 2012-07-20 07:55 | -38.860 | 178.520 | 36 | 6.6 | 2007-08-20 21:30 | 27.773 | 139.615 | 481 | 5.8 |
| 2012-07-23 13:10 | -8.942 | 123.730 | 117 | 5.2 | 2007-08-25 20:11 | -5.808 | 146.658 | 39 | 5.5 |
| 2001-08-05 11:01 | 51.254 | -130.746 | 15 | 6.6 | 2008-08-01 10:35 | 13.505 | 120.782 | 135 | 5.6 |
| 2001-08-06 05:14 | 37.216 | 22.693 | 75 | 6.2 | 2008-08-04 04:42 | 49.860 | 156.380 | 74 | 5.8 |
| 2001-08-15 17:52 | -21.984 | -179.535 | 597 | 6.5 | 2008-08-04 20:45 | -5.914 | 130.199 | 173 | 6.3 |

8°的偏差，或在分量命名及极性上存在问题。我们的主要目标是为广大的 CEArray 数据使用者们在开展“基于旋转”的地震学研究时提供一种问题鉴别的方法和参考。

1 数据和分析

首先人为检查了 126 个发生于 2007 年

7 月~2008 年 8 月，震中距 30°~90°之间 $M_{5.5}$ 以上地震，并挑选出 106 个信噪比 (SNR) 较高的地震事件(见表 1)。这些地震事件的总体震中距和方位角覆盖较为合理，其中部分事件集中分布在后方位角 30°~210°的环太平洋地震带及爪哇海沟。我们对记录重新采样至每秒 20 个点。如前所述，CEArray 是由国家和区域地震台网联合组

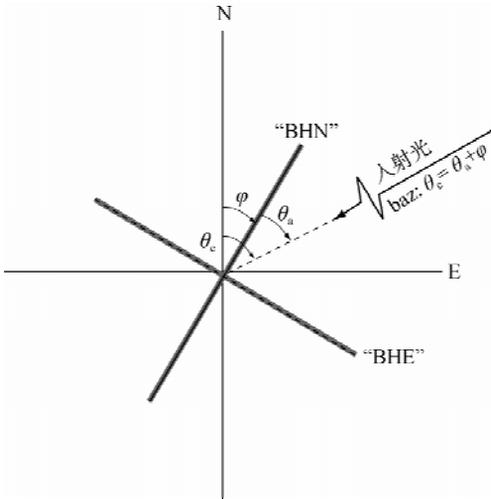


图2 仪器方位角示意图。给出了“BHN”分量方位(φ)、计算得到的BHN分量方位以及台站后方位角之间的关系

合成的“虚拟”台阵,采用了一系列中一宽频带的拾振器,包括 STS-2, GURALP3T, GURALP3ESP, KS2000 以及我国自行研制的宽频拾振器系列,如 JCZ-1(360s~50Hz), CTS-1(120s~50Hz), FBS-3(20s~20Hz)等。为保证带宽一致,我们对所有波形数据做了 5s~50s 的两个极点巴特沃斯带通滤波。为保证分析上的统计稳定性,我们只保留了事件记录数大于 5 的台站,因此有效台站数量从约 850 个减少到 803 个。

定义仪器方向,或者地震计方位角 φ 为计算得到的“BHN”方向与地理北极之间的夹角,顺时针为正。我们的分析基于以下简单但合理的假设:在均匀成层各向同性介质中传播的 P 波,其质点运动轨迹应位于包含震源与接收台站的垂直平面内,因此其在水平面内的投影平行于震源后方位角方向。我们还假定三个分量相互正交,并且垂向分量严格垂直于水平面。

这样就可以利用远场地震波质点运动来估计存在方位偏差台站的地震计方位角。从示意图 2 可以看出,如果“北”分量偏差了 φ 度,那么利用 P 波质点运动估计出的视后方位角为

$\theta_a = \theta_c - \varphi$, 其中 θ_c 为利用源-台站几何关系计算出来的后方位角。为计算视后方位角,首先要计算两个水平分量的协方差矩阵:

$$c_{ij} = \int_0^T u_i(t)u_j(t)dt \quad i, j = 1, 2 \quad (1)$$

这里 T 是时窗长度。在不存在噪声的情况下,协方差矩阵 c 将存在一个非零本征值, θ_a 是该本征值对应的本征矢量的方向:

$$\theta_a = \cot^{-1} \frac{c_{22} - c_{11} + \sqrt{(c_{11} - c_{22})^2 + 4c_{12}^2}}{2c_{12}} \quad (2)$$

当存在噪声时, c 将具有两个非零本征值 λ_1, λ_2 。比值 λ_2/λ_1 反映了质点运动的线性度,同时也可以衡量噪声水平以及近台散射情况,它们通常能直接影响测量的误差。

为更准确估计 φ , 我们提出了一种方法,通过使台站记录到的多个地震事件横向能量最小获得最佳 φ 估值,我们称该方法为“SNR 为权重的多事件”方法。对于设定的分量方位角 φ , 我们首先对每一个事件的水平分量按照计算得到的后方位角旋转至径向和横向分量,然后再计算所有事件横向分量中的 P 波能量加权:

$$E_T(\varphi) = \frac{\sum_{i=1}^N \omega_i E_T^i(\varphi)}{\sum_{i=1}^N \omega_i} \quad (3)$$

这里, $E_T^i(\varphi)$ 是计算得到的第 i 个事件在某一选定时窗内横向分量的能量, N 是总的事件数, ω_i 是权重,为两个水平分量信噪比 (R) 的平均值: $\omega_i = 0.5 \cdot (R_{i,BHN} + R_{i,BHE})$ 。在计算 $E_T(\varphi)$ 前,我们还利用两个水平分量的总 P 波能量对地震信号进行了归一化。

我们在 $0^\circ \sim 180^\circ$ 范围内以 1° 为间隔变化 φ 。当横向分量中叠加后的 P 波能量达到最小值时，认为此时的方位角代表台站方向。有两种可能的值， φ 和 $\varphi + 180^\circ$ 都可以使能量达到最小。通过计算垂向和径向分量相关系数，我们选择正相关系数对应的角度作为最终的台站方位角。该方法已被证明可有效获取稳健的地震仪方位角估值 (Niu *et al.*, 2007)。为对比起见，我们还估计了 Ekstrom 和 Busby(2008) 甄别出的美国数字地震台网 (USArray) 台阵中存在方位偏差的地震台站的方位角。我们的估值和他们利用面波给出的结果吻合很好 (图 3)。

由于 E_T^{min} 是高斯噪声的平方和，可认为满足 χ^2 分布。如果没有包含任何信号 P 波的能量，那么 E_T/E_T^{min} 将满足 F 分布。Jenkins 和 Watts(1968) 给出，对一个具有 n 个自由度， k 个参数的系统，满足置信水平为 α 的置信区间可表达为：

$$\frac{E_T(\varphi)}{E_T^{min}} \leq 1 + \frac{k}{n-k} f_{k,n-k}(1-\alpha) \quad (4)$$

我们的情况中 $k=1$ ， $\alpha=0.05$ ， n 取每秒 1 个自由度 (Silver and Chan, 1991)。公式 (4) 给出的不确定性估计并未考虑数据的噪声水平。对噪声数据而言，该值将明显低于真实水平，因为任意低于噪声水平的所对应的 φ 都会被认为是可能的解。因此，我们用 E^{noise} 替换了 E_T^{min} ，前者取为直达 P 波之前两个水平分量噪声水平的平均值。我们也利用这一修正的公式，对单个事件分析给出 φ 的上下限，以确保使公式 (3) 达其最小值的解位于上下限之间。图 4 给出了对台站 HE. WAT 分析测量的例子。归一化后的能量在横向的分量随设定的地震计方位角而变化 (虚线)。最小能量对应的解 (粗实线) 则位于利用单个事件给出的值上限 (加号) 和下限 (减号) 所界定的区域内。

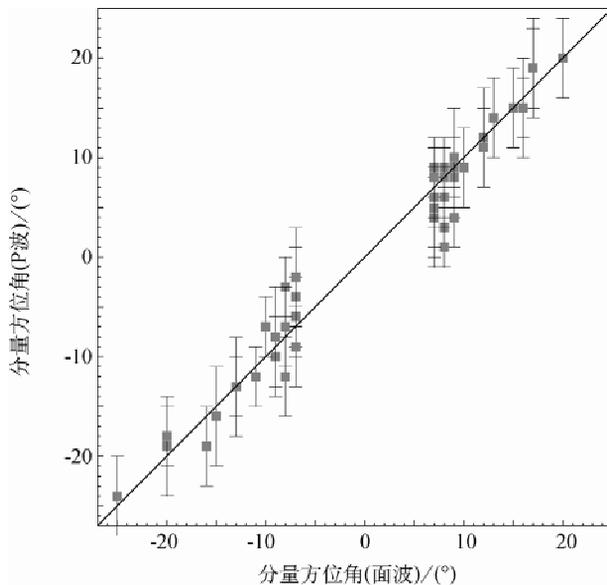


图 3 利用 P 波质点运动分析对美国数字地震台网部分问题台站 (Ekstrom and Busby, 2008) 方位角分析结果的对比。Ekstrom 和 Busby(2008) 给出的是分量方位角的校正值，为便于对比，我们利用这些值计算了真实的分量方位角。两种不同方法给出的结果总体吻合较好

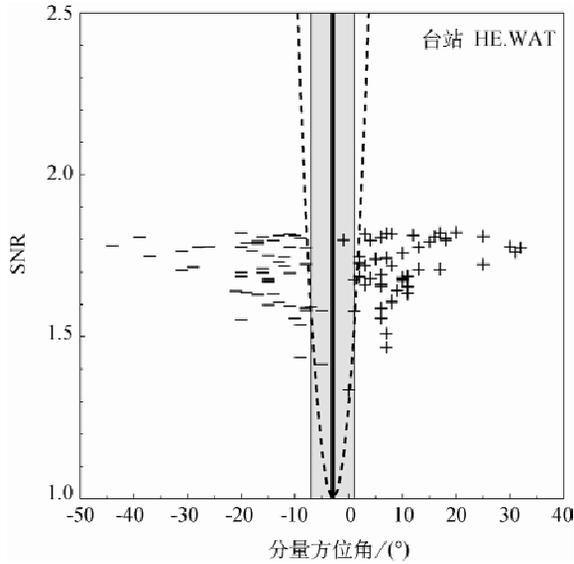


图 4 以 HE. WAT 台站为例给出了多事件测量结果(粗的竖直线)、不确定性范围(垂直灰色区域),以及对单个地震事件分析给出的方位角上限(正号)及下限(负号)。虚线为横向分量上 P 波时窗内的能量和,已利用 P 波前噪声进行了归一化。归一化后的 P 波能量随设定的 BHN 方位角而变化,在 -3° 时达到最小值

2 结果和讨论

分析结果表明 CEArray 数据远比我们预期的要复杂。我们发现存在相当数量的台站方位角偏差大于 10° 。利用不同事件计算的 P 波垂向和径向分量相关系数往往有正有负。我们对这些台站的波形记录进行了仔细检查,发现它们与附近台站的波形差别很大。这使我们发现了一些台站的分量标签错置情况。于是我们设计了一个特殊的程序来甄别这些台站,在测定它们的方位角时也倍加小心。

对每一个台站,首先结合邻近台站构建出一个 15~30 个台站组成的虚拟台阵。取决于台站的位置,虚拟台阵可以由两个或更多区域台网中的台站构成。对每个台站记录到的每一条事件记录,我们手动拾取 P 波

到时,然后线性叠加不同台站的波形,最终生成了每一个分量的参考波形:

$$u_j^0(t) = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M u_{ij}(t + \tau_i) \quad j = 1, 2, 3 \quad (5)$$

这里, $u_j^0(t)$ 是叠加后的波形, τ_i 是台站的延迟时间, M 是台站数, j 表明分量。然后我们计算参考波形和台站记录之间的相关系数(cc)。正如预期的那样,一个正常台站所有事件的三分量都会给出较大的 cc 值(多数情况下大于 0.9)。对于分量名称标记错误的台站,cc 值通常都很低,且符号有正有负。为了估计这些存在分量标签错误台站的仪器方位角,我们用试错法对所有可能的分量名称误标进行尝试:例如,对调 BHN 和 BHE, BHN 和 BHZ 以及 BHE 和 BHZ 分

量。如果某次交换正确，测量误差会急剧降低，P 波质点运动轨迹也会与源-台站的几何路径相吻合。除了分量命名错误外，我们还发现了一些台站的 BHN 分量放置在了东西向上，其它台站则存在一种或几个分量极性的反转问题。这些类型的问题可以比较幸运地用以上分析方法加以甄别。表 2 列出了存在这些问题的特殊台站。我们鉴别出来的问题可以归纳为 8 类：(1)BHE 极性反转；(2)BNN 极性反转；(3)BHE 和 BHN 分量的极性均反转；(4)BHN 和 BHE 分量发生了交换；(5)BHE 和 BHZ 分量交换；(6)BHN 分量安置在正东方向上；(7)BHN 分量布设在正西方向上；(8)BHN 和 BHE 分量互换，且极性也均倒转。通过以上分析，我们发现整个台网地震台站的垂向分量几乎都不存在问题。我们仅发现了 3 个台站的垂向分量被误标为东西分量。

完成对这些特殊台站的预处理后，得到的 BHN 分量方位角应该位于 $-45^{\circ} \sim 45^{\circ}$ 之间。图 5 给出了测得的 803 个台站 BHN 分量方位角分布。请注意给出的是 BHN 分量

的绝对方向，与 Ekstrom 和 Busby(2008)给出的校正角度存在符号上的差别。方位角均值为 -0.9° ，均方差为 6.5° 。正负方向上的方位角最大偏差可达到 42° 和 -43° 。44.7% 的台站位于北向 3° 以内，28.3% 的台站位于方位角 $\pm 4 \sim \pm 7^{\circ}$ 之间；另有 27.0% 台站方位角偏离北向 8° 以上。

表 2 给出了台站方位偏差大于 8° 的 270 个台站以及需要进行特殊处理，包括单个/两个水平分量极性反转，两个分量互换或多种处理的台站名称及校正信息。我们还列出了估计 BHN 方位角时用到的事件个数及测量误差。特殊台站的预处理过程细节也包含其中。在多数情况下，这些特殊台站所表现出来的问题在整个一年的时间段内都比较稳定。我们已在某个省台网证实了这种仪器方位偏差问题的存在，他们发现问题出在给拾振器浇筑石灰地基时加入了钢筋柱，干扰了台站周围的磁场，这种情况下指南针给出的北向将完全错误。但是对于某些台站，该问题在一段时间后似乎又消失了。我们认为，可能是在仪器维护过程中校正了发现的问题

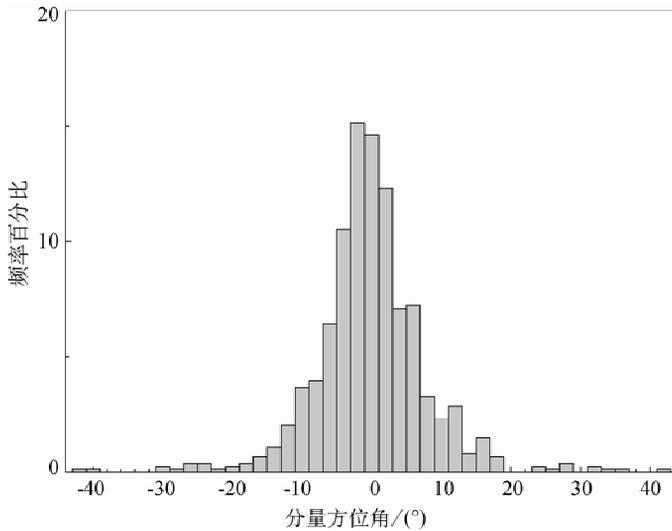


图 5 测得的 CEArray 台阵 803 个地震台站 BHN 分量方位角估值直方图

表2 存在问题的 CEARray 台站方位角列表

| 台站代码 | 事件数 | $\varphi/(^{\circ})$ | 偏差/ $(^{\circ})$ | 特殊处理 |
|----------------------|-----|----------------------|------------------|---|
| AH. BAS | 43 | 10 | 3 | E \leftrightarrow N(\rightarrow 20080503) |
| AH. BEB | 38 | -6 | 4 | E \leftrightarrow N(\rightarrow 20080428) |
| AH. CHZ | 37 | -7 | 3 | E \leftrightarrow N(\rightarrow 20080503) |
| AH. DYN | 43 | -23 | 3 | N \rightarrow E, E \rightarrow -N(20070825 \rightarrow) |
| AH. FZL | 34 | 2 | 3 | E \leftrightarrow N(\rightarrow 20080302) |
| AH. HBE | 41 | 13 | 3 | |
| AH. HEF | 9 | -9 | 4 | |
| AH. HNA | 50 | 3 | 3 | E \leftrightarrow N(\rightarrow 20080428) |
| AH. HSH* | 44 | 1 | 3 | -E \leftrightarrow -N(\rightarrow 20080428) N \rightarrow -N, E \rightarrow -E(20080428 \rightarrow) |
| AH. LAN | 43 | -30 | 4 | N \rightarrow E, E \rightarrow -N |
| AH. MAS | 46 | 5 | 3 | E \leftrightarrow N(\rightarrow 20080501) |
| AH. MCG [†] | 24 | 1 | 1 | E \leftrightarrow N(\rightarrow 20080501) |
| | 5 | -35 | 3 | N \rightarrow E, E \rightarrow -N(20080701 \rightarrow) |
| AH. SCH | 37 | -1 | 3 | E \leftrightarrow N(\rightarrow 20080501) |
| AH. SIX | 49 | 1 | 3 | E \leftrightarrow N(\rightarrow 20080501) |
| AH. TOL | 45 | -2 | 3 | E \leftrightarrow N(\rightarrow 20080501) |
| BJ. LBP | 26 | -8 | 3 | |
| BJ. MIY | 39 | -10 | 3 | |
| BJ. NKY | 42 | -14 | 3 | |
| BJ. XBZ | 18 | -13 | 4 | |
| BU. DOH | 28 | 8 | 4 | N \rightarrow E, E \rightarrow -N |
| BU. HUA | 19 | -21 | 3 | |
| BU. MDY | 24 | 15 | 3 | |
| BU. TST | 32 | -4 | 4 | N \rightarrow -N, E \rightarrow -E |
| BU. ZHL | 35 | 5 | 3 | N \rightarrow E, E \rightarrow -N |
| BU. ZUH | 25 | -9 | 4 | |
| CQ. CQT | 40 | 6 | 3 | E \leftrightarrow N |
| CQ. FUL | 31 | -9 | 4 | |
| CQ. ROC | 54 | -13 | 2 | |
| CQ. SHZ | 30 | -7 | 3 | N \rightarrow -N, E \rightarrow -E |
| CQ. SNB | 9 | 36 | 3 | |
| CQ. WAZ | 41 | 1 | 2 | E \leftrightarrow N |
| FJ. FZCM | 13 | 5 | 3 | E \leftrightarrow N(20080704-20080710) |
| FJ. LJTL | 33 | -12 | 3 | |
| FJ. NPDK | 15 | -8 | 4 | |
| FJ. PHSG | 27 | -20 | 5 | |
| FJ. PTNR | 31 | -8 | 3 | |
| FJ. TNSC | 31 | 36 | 3 | N \rightarrow E, E \rightarrow -N |
| FJ. WYXF | 42 | 29 | 4 | N \rightarrow -E, E \rightarrow N |
| FJ. YCTM | 32 | 16 | 3 | |
| FJ. YXBM | 37 | 34 | 4 | |
| GD. DGD | 28 | -11 | 3 | |
| GD. LTK | 25 | 13 | 3 | |
| GD. NAO | 27 | -24 | 4 | |
| GD. SHD | 26 | 11 | 4 | |
| GD. TIX | 30 | -8 | 3 | |
| GD. XFJ | 27 | 16 | 3 | |
| GD. YGX | 21 | -9 | 5 | |
| GD. ZHH | 29 | -43 | 3 | N \rightarrow -E, E \rightarrow N |
| GS. BKT | 7 | -19 | 6 | N \rightarrow -N, E \rightarrow -E |

表 2 (续)

| 台站代码 | 事件数 | $\varphi/(\circ)$ | 偏差/ (\circ) | 特殊处理 |
|---------|-----|-------------------|---------------|-----------------|
| GS. BYT | 25 | -10 | 4 | |
| GS. DBT | 31 | 8 | 4 | |
| GS. HCH | 26 | 10 | 3 | |
| GS. HJT | 19 | 14 | 3 | |
| GS. HXT | 11 | 34 | 4 | N→-E, E→N |
| GS. HYS | 19 | 10 | 3 | |
| GS. JFS | 28 | 12 | 4 | |
| GS. JNT | 39 | 3 | 3 | N→-E, E→N |
| GS. JYG | 33 | 9 | 4 | E↔N |
| GS. LTT | 16 | 9 | 4 | |
| GS. LYT | 30 | -11 | 3 | |
| GS. MIQ | 12 | -11 | 3 | |
| GS. NXT | 5 | -26 | 2 | |
| GS. PLT | 29 | 11 | 4 | |
| GS. SBC | 20 | 17 | 4 | |
| GS. SNT | 36 | 15 | 4 | |
| GS. ZHQ | 21 | 9 | 5 | |
| GS. ZHY | 26 | -11 | 3 | |
| GX. PXS | 42 | 2 | 2 | E→-E(20080302→) |
| GX. WZD | 26 | -5 | 4 | N→-N, E→-E |
| GX. YLS | 44 | 10 | 3 | |
| GX. YTT | 34 | -13 | 4 | |
| GZ. YPT | 9 | -40 | 6 | N→E, E→-N |
| GZ. ZFT | 6 | -8 | 4 | |
| GZ. ZYT | 9 | -8 | 4 | |
| HA. DA | 40 | -41 | 3 | |
| HA. NY | 50 | 1 | 3 | E↔N |
| HB. DWU | 37 | -15 | 3 | |
| HB. ENS | 9 | -3 | 4 | E↔Z |
| HB. HME | 41 | -12 | 3 | |
| HB. JME | 38 | -11 | 3 | |
| HB. SYA | 17 | -1 | 4 | E↔N |
| HB. SZI | 10 | 23 | 5 | |
| HB. XNI | 42 | 27 | 3 | |
| HB. ZUX | 51 | -10 | 4 | |
| HE. CHD | 13 | 4 | 4 | N→E, E→-N |
| HE. HST | 38 | 12 | 3 | |
| HE. KAB | 21 | 8 | 3 | |
| HE. LOH | 30 | -13 | 2 | |
| HE. LUQ | 10 | 18 | 5 | |
| HE. SHX | 21 | -17 | 4 | N→-N |
| HE. WEC | 38 | -18 | 3 | |
| HE. YON | 52 | 12 | 3 | |
| HE. ZJK | 32 | -8 | 2 | |
| HI. QSL | 27 | 0 | 3 | E→-E |
| HI. QZN | 11 | 4 | 2 | E↔Z |
| HL. BEL | 28 | -16 | 3 | |
| HL. BJS | 16 | 42 | 3 | |
| HL. DNI | 15 | -25 | 4 | |
| HL. FUY | 18 | -1 | 5 | N→-N, E→-E |
| HL. HEG | 38 | -1 | 3 | E→-E |

表2(续)

| 台站代码 | 事件数 | $\varphi/(^{\circ})$ | 偏差/ $(^{\circ})$ | 特殊处理 |
|----------|-----|----------------------|------------------|---|
| HL. JMS | 38 | -28 | 4 | N \rightarrow -N, E \rightarrow -E |
| HL. LIH | 38 | 41 | 3 | N \rightarrow -E, E \rightarrow N |
| HL. MOH | 41 | -11 | 3 | |
| HL. QAN | 28 | 27 | 3 | |
| HL. QTH | 18 | -10 | 2 | |
| HL. TAH | 29 | -10 | 3 | |
| HL. WUC | 26 | -12 | 2 | |
| HL. XBH | 18 | -27 | 4 | |
| HL. XUK | 13 | -10 | 3 | |
| HN. HOJ | 5 | 11 | 4 | |
| HN. JIS | 11 | 3 | 3 | -E \leftrightarrow ..N |
| HN. TAY | 48 | 34 | 5 | N \rightarrow -N, E \rightarrow -E |
| JL. BCT | 43 | 22 | 2 | N \rightarrow E, E \rightarrow -N |
| JL. CBS | 46 | -12 | 7 | |
| JL. CBT | 26 | 5 | 3 | N \rightarrow -E, E \rightarrow N |
| JL. CN2 | 8 | -10 | 4 | |
| JL. DHT | 40 | 0 | 3 | N \rightarrow -N, E \rightarrow -E |
| JL. HNS | 20 | 12 | 3 | N \rightarrow -E, E \rightarrow N |
| JL. HST | 11 | 10 | 2 | N \rightarrow -E, E \rightarrow N |
| JL. JCT | 30 | 21 | 3 | N \rightarrow E, E \rightarrow -N(\rightarrow 20080626) |
| JL. LHT | 29 | 0 | 3 | N \rightarrow -N, E \rightarrow -E |
| JL. LYT | 39 | 25 | 3 | N \rightarrow E, E \rightarrow -N |
| JL. MJT | 37 | 45 | 4 | N \rightarrow -E, E \rightarrow N |
| JL. PST | 41 | 25 | 3 | N \rightarrow -N, E \rightarrow -E |
| JL. SPT | 43 | -7 | 3 | N \rightarrow -E, E \rightarrow N |
| JL. SYZT | 40 | 1 | 4 | N \rightarrow -E, E \rightarrow N |
| JL. YFT | 30 | -17 | 3 | |
| JL. YST | 11 | 5 | 5 | E \leftrightarrow N |
| JS. CZ | 23 | 31 | 3 | |
| JS. HA | 19 | 38 | 5 | N \rightarrow E, E \rightarrow -N |
| JS. HUA | 36 | -14 | 5 | |
| JS. JJ | 34 | -8 | 4 | N \rightarrow E, E \rightarrow -N |
| JS. JT | 30 | -11 | 3 | |
| JS. KS | 21 | -3 | 4 | N \rightarrow -E, E \rightarrow N |
| JS. LAS | 24 | -7 | 3 | N \rightarrow -E, E \rightarrow N |
| JS. LIS | 34 | -15 | 3 | |
| JS. LYG | 45 | -23 | 3 | E \leftrightarrow N |
| JS. NT | 41 | -21 | 3 | N \rightarrow -N, E \rightarrow -E |
| JS. PX | 21 | 8 | 3 | |
| JS. PZ | 17 | 10 | 3 | |
| JS. RD | 12 | -27 | 3 | N \rightarrow -E, E \rightarrow N |
| JS. TZ | 11 | -5 | 4 | N \rightarrow -N, E \rightarrow -E(20080408 \rightarrow) |
| JS. XH | 13 | -42 | 4 | N \rightarrow -E, E \rightarrow N |
| JS. XY | 31 | 12 | 3 | |
| JS. YX | 23 | 32 | 3 | |
| JS. ZJ | 33 | -11 | 3 | |
| JX. ANY | 32 | 14 | 3 | |
| JX. DAY | 31 | -11 | 3 | |
| LN. ANS | 45 | 17 | 3 | |
| LN. CHY | 47 | -1 | 3 | N \rightarrow -N, E \rightarrow -E |
| LN. FSH | 43 | -18 | 3 | |

表 2 (续)

| 台站代码 | 事件数 | $\varphi/(\circ)$ | 偏差/ (\circ) | 特殊处理 |
|----------------------|-----|-------------------|---------------|-----------------------|
| LN. GAX | 47 | 3 | 3 | N→E, E→-N(20080508→) |
| LN. HUR | 44 | 13 | 3 | |
| LN. LYA | 47 | 15 | 3 | |
| LN. NAP | 40 | 8 | 2 | |
| LN. QYU | 16 | -16 | 5 | |
| LN. TIL | 41 | -8 | 4 | |
| LN. YKO | 50 | -2 | 3 | E↔N |
| NM. BAC | 40 | 8 | 3 | |
| NM. BTO | 21 | -7 | 4 | E↔N |
| NM. CHR | 25 | 11 | 3 | |
| NM. DSH [†] | 28 | -37 | 2 | N→E, E→-N(→20080304) |
| | 9 | -11 | 3 | /(20080304→) |
| NM. GNH | 41 | -6 | 2 | N→-E, E→N |
| NM. HLH | 18 | -12 | 5 | |
| NM. IDR | 21 | -13 | 2 | |
| NM. JIN | 29 | -8 | 3 | |
| NM. LCH | 42 | -42 | 3 | |
| NM. LIX | 11 | 10 | 3 | |
| NM. MDG | 12 | 30 | 5 | N→-E, E→N |
| NM. NIC | 30 | -9 | 3 | |
| NM. QSH | 42 | -30 | 2 | |
| NM. XIH | 42 | -34 | 3 | N→-N, E→-E |
| NM. XSZ | 39 | 18 | 3 | N→-N, E→-E |
| NM. ZLT | 34 | -11 | 4 | |
| NX. LWU | 33 | 23 | 5 | |
| NX. TLE | 30 | 9 | 3 | |
| NX. XSH | 45 | -27 | 3 | |
| NX. ZHW | 46 | -11 | 3 | |
| QH. DCD | 51 | -13 | 6 | |
| QH. DLH | 49 | -9 | 3 | |
| QH. HTG | 8 | 8 | 4 | |
| QH. LED | 43 | 27 | 3 | N→-N, E→-E |
| QH. QIL | 46 | 12 | 4 | |
| QH. TTH | 38 | 0 | 6 | E↔N |
| QH. YUS | 56 | 2 | 4 | E↔N |
| SC. HLI | 38 | 25 | 4 | |
| SC. HSH | 47 | 9 | 4 | |
| SC. JJS | 40 | -8 | 2 | |
| SC. MEK | 50 | -10 | 4 | |
| SC. MGU | 46 | 1 | 3 | N→-N, E→-E(→20070809) |
| SC. REG | 53 | -8 | 3 | |
| SC. SMI | 51 | 12 | 7 | |
| SC. XCE | 43 | -11 | 4 | |
| SC. XCO | 41 | 11 | 3 | |
| SD. BHC | 39 | -10 | 3 | |
| SD. CHD | 46 | -33 | 3 | N→E, E→-N |
| SD. YTA | 41 | -5 | 3 | E↔N |
| SH. NAH | 8 | -21 | 5 | N→E, E→-N |
| SH. QHS | 20 | -10 | 3 | |
| SH. ZHY | 20 | -34 | 3 | N→-N |
| SN. HZHG | 57 | -9 | 5 | E↔N(20070911→) |

表2(续)

| 台站代码 | 事件数 | $\varphi/(^{\circ})$ | 偏差/ $(^{\circ})$ | 特殊处理 |
|-----------|-----|----------------------|------------------|--|
| SN. LOXT | 50 | 10 | 4 | |
| SN. SUDE | 51 | -12 | 4 | |
| SN. YULG | 26 | 0 | 4 | E \leftrightarrow N |
| SX. DAX | 38 | -15 | 3 | |
| SX. DOS | 33 | -9 | 3 | |
| SX. HMA | 55 | -8 | 3 | |
| SX. HSH | 37 | -15 | 4 | |
| SX. KEL | 50 | -16 | 3 | |
| SX. LIF | 55 | -8 | 3 | |
| SX. NIW | 54 | -15 | 3 | |
| SX. PIG | 44 | -12 | 3 | |
| SX. SHZ | 48 | 3 | 4 | E \leftrightarrow N |
| SX. TAG | 48 | -9 | 3 | |
| SX. XAX | 53 | -34 | 3 | N \rightarrow E, E \rightarrow -N |
| SX. XAY | 43 | -8 | 3 | |
| SX. XIX | 52 | 17 | 3 | |
| SX. XIY | 50 | -9 | 4 | |
| SX. YJI | 49 | -33 | 4 | N \rightarrow E, E \rightarrow -N |
| SX. ZOQ | 54 | 28 | 3 | |
| TJ. YGZ | 32 | 22 | 3 | N \rightarrow E, E \rightarrow -N |
| XJ. AHQ | 45 | 12 | 5 | |
| XJ. ATS | 31 | 10 | 6 | |
| XJ. BAC | 39 | 8 | 4 | |
| XJ. BTS | 34 | 9 | 4 | |
| XJ. CBC | 37 | 15 | 3 | |
| XJ. FUY | 49 | 10 | 4 | |
| XJ. HBH | 47 | -24 | 4 | |
| XJ. HTTZ0 | 9 | 15 | 4 | |
| XJ. KMY | 38 | 0 | 3 | N \rightarrow E, E \rightarrow -N(20080714 \rightarrow) |
| XJ. KOL | 16 | -10 | 5 | |
| XJ. KSH | 32 | 11 | 5 | |
| XJ. KSZ | 23 | 11 | 3 | |
| XJ. LHG | 48 | 12 | 5 | |
| XJ. LSG | 38 | 9 | 3 | |
| XJ. QHE | 47 | -9 | 4 | |
| XJ. RGN | 40 | -34 | 5 | N \rightarrow E, E \rightarrow -N |
| XJ. RUQ | 5 | 12 | 4 | |
| XJ. SHZ | 30 | 12 | 6 | |
| XJ. SMY | 36 | 17 | 4 | |
| XJ. STZ | 46 | 9 | 4 | |
| XJ. TAC | 43 | -2 | 3 | N \rightarrow -N, E \rightarrow -E |
| XJ. TAG | 40 | -10 | 4 | |
| XJ. WMQ | 15 | -12 | 5 | |
| XJ. WSC | 20 | 15 | 5 | |
| XJ. YMS | 5 | 16 | 3 | |
| XZ. DXI | 10 | 8 | 3 | |
| XZ. NMU | 34 | 8 | 4 | |
| XZ. PLA | 26 | 4 | 4 | N \rightarrow -N, E \rightarrow -E |
| XZ. SNA | 31 | 3 | 4 | N \rightarrow -N, E \rightarrow -E |
| XZ. SQHE | 30 | -12 | 4 | |
| YN. BAS | 6 | 0 | 3 | E \rightarrow -E(20080624 \rightarrow) |

表 2 (续)

| 台站代码 | 事件数 | $\varphi/(\circ)$ | 偏差/ (\circ) | 特殊处理 |
|---------|-----|-------------------|---------------|------|
| YN. HEQ | 18 | -8 | 5 | |
| YN. KMI | 13 | 2 | 5 | E↔Z |
| YN. LUQ | 27 | 15 | 3 | |
| YN. MIL | 30 | -11 | 4 | |
| YN. SIM | 30 | -10 | 5 | |
| YN. WES | 29 | -19 | 3 | |
| YN. YAJ | 33 | 11 | 4 | |
| YN. YOD | 35 | 12 | 3 | |
| YN. YUM | 8 | 12 | 4 | |
| YN. ZAT | 47 | 12 | 5 | |
| ZJ. CHA | 47 | -23 | 2 | |
| ZJ. JAX | 46 | -31 | 3 | |
| ZJ. LIA | 49 | -8 | 3 | |
| ZJ. NIH | 41 | -29 | 3 | |
| ZJ. WXJ | 46 | 8 | 2 | |
| ZJ. XAJ | 13 | -2 | 3 | E↔N |
| ZJ. XIC | 37 | -14 | 3 | |
| ZJ. ZHS | 47 | -8 | 3 | |

*：台站在进行特殊处理后，在整个研究时间范围内的仪器方位角都比较一致

†：即或经过特殊处理，台站在整个研究时期内也表现出不一致的方位角。按照时期给出了 2 个估值：YYYYMMDD

→：在时间 YYYYMMDD 后对该台站进行特殊操作

→YYYYMMDD：在时间 YYYYMMDD 之前进行特殊操作

(我们已经从一个省局台网——安徽台网获取了维护并校正的确凿信息)。表 2 给出的台站方位角问题及分量误命名信息对于基于波形旋转的地震学分析至关重要。这从近期的一项剪切波分裂研究(Li and Niu, 2010)以及接收函数分析(Liu and Niu, 2011)研究中可以看出。

在一维各向同性介质中，P 波产生的位移平行于波传播方向。也就是说，在横向分量上不产生任何位移。但在实际数据中，往往会在横向分量上观测到较强的 P 波能量。除了地震计方位角偏差及噪声外，以下几种情况：(1)地震波各向异性；(2)横向不均匀性；(3)倾斜结构，均可以影响 P 波质点运动。以上因素引起的质点运动偏差，强烈依赖于入射波的后方位角，这与台站方位角偏差造成的影响不同。原则上，当事件覆盖方位角较好时，这些不同因素造成的影响完全可以区分开来。另一方面，3 种不同结构带

来的影响对后方位角的依赖性也不同。这些影响通常可以用以下公式表示出来(Schulte-Pelkum *et al*, 2001; Davis, 2003; Fontaine *et al*, 2009)：

$$\delta\phi = \phi_0 + a\sin\phi + b\cos\phi + c\sin(2\phi) + d\cos(2\phi) \quad (6)$$

其中， $\sin 2\phi$ ， $\cos 2\phi$ 项代表了各向异性的贡献，而 $\sin\phi/\cos\phi$ 指示了倾斜结构的贡献。Davies(2003)采用理论计算表明由于地幔各向异性导致的质点极性偏差很小(小于 1°)。Schulte-Peklum 等(2001)对 264 个 GSN 台站长周期 P 波质点运动分析给出了台站方位角均值为 7.2° ，可以看做是近地表结构及地震计方位角偏差的共同贡献。因此我们认为，方位角误差达到 8° 以上可以表征台站真实存在方位角偏差。

我们没有列出方位角估值在 $-7^\circ \sim 7^\circ$ 之

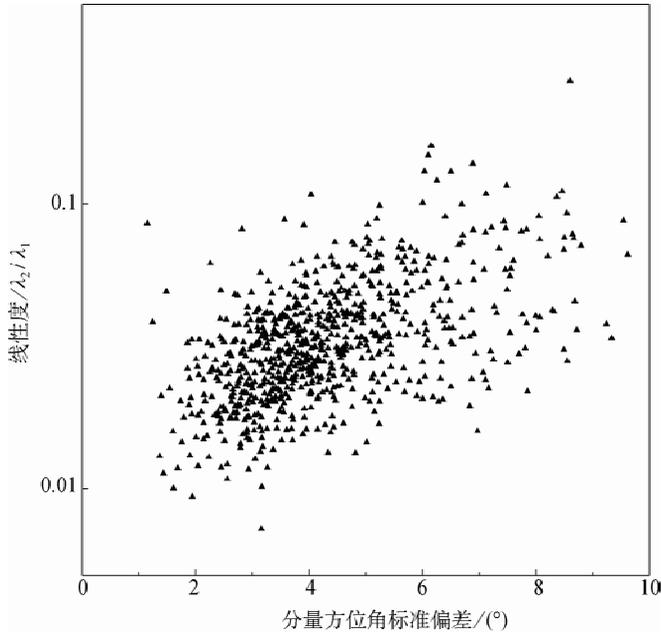


图6 获得的BHN分量方位角不确定性随P波质点运动线性度的变化。通过对不同台站波形记录的“噪声权重”分析叠加后获得。注意这二者之间存在微弱的正相关性,表明噪声以及散射对观测到的方位角偏差具有些许贡献

间的台站,主要出于两点考虑:(1)对于接收函数以及面波极性研究,这样水平的偏差不会给结果带来很大影响;(2)除去地震计方位角偏差这一因素,近台站结构也极有可能造成这种水平的偏差。由于我们用到的是远场地震事件,震源定位引起的质点运动误差几乎可以忽略。另一方面,测量误差似乎与P波质点运动的线性度正相关(图6),表明噪声和散射波对观测到的方位角偏差都有些许贡献,因为各向异性和倾斜结构对质点运动线性度的影响微乎其微。

3 小结

本研究中,我们提出了一种多事件方法来估计地震台站的仪器方位角,同时还提出了一种基于台阵分析的方法甄别“问题”台站。我们将该方法应用到新近建成的CE-

Array。利用中等频率数据,我们给出了事件数大于5的台站方位角估值,共鉴别出270个CEArray台站在分量方位角、分量命名或极性方面存在问题。对于这些台站记录到的波形数据,必须通过预处理对以上问题进行校正。

参考文献

- Cessaro R K and Butler R(1987). Observations of transverse energy for P waves recorded on a deep-ocean borehole seismometer located in the northwest Pacific. *Bull Seismol Soc Am* **77**: 2163-2180.
- Chen Q F, Chen Y and Li L(2006). China Digital Seismic Network improves coverage and quality. *Eos Trans AGU* **87**(30):294,299.
- Davis P M(2003). Azimuthal variation in seismic anisotropy of the southern California uppermost mantle. *J Geophys Res* **108**, doi:10.1029/2001

- jb000637.
- Ekstrom G and Busby R W(2008). Measurements of seismometer orientation at USArray Transportable Array and backbone stations. *Seism Res Lett* **79**:554—561,doi:10.1785/gssrl.79.4.554.
- Fontaine F R, Barruol G, Kennett B L N, Bokelmann G H R and Reymond D(2009). Upper mantle anisotropy beneath Australia and Tahiti from P wave polarization: Implications for real-time earthquake location. *J Geophys Res* **114**, doi: 10.1029/2008jb005709.
- Jenkins G M and Watts D G(1968). *Spectra Analysis and Its Applications*. Holden-Day, San Francisco, Calif, 525pp.
- Laske G(1995). Global observation of off-great-circle propagation of long-period surface waves. *Geophys J Int* **123**:245—259.
- Li J and Niu F(2010). Seismic anisotropy and mantle flow beneath northeast China inferred from regional seismic networks. *J Geophys Res* **115**: B12327, doi:10.1029/2010JB007470.
- Liu H and Niu F(2011). Receiver function study of the crustal structure of northeast China with regional seismic arrays. *Earthquake Science* **24** (1):27—33.
- Niu F, Bravo T, Pavlis G, Vernon F and Rendon H (2007). Receiver function study of the crustal structure of the southeastern Caribbean plate boundary and Venezuela. *J Geophys Res* **112**, doi:10.1029/2006JB004802.
- Schulte-Pelkum V, Masters G and Shearer P M (2001). Upper mantle anisotropy from long-period P polarization. *J Geophys Res* **106**:21917—21934.
- Silver P G and Chan W(1991). Shear wave splitting and subcontinental mantle deformation. *J Geophys Res* **96**:16429—16454.
- Wang B and Niu F(2010). A broad 660-km discontinuity beneath northeastern China revealed by dense regional seismic networks in China. *J Geophys Res* **115**: B06308, doi: 10.1029/2009JB006608.
- Zheng X F, Ouyang B, Zhang D N, Yao Z X, Liang J H and Zheng J(2009). Technical system construction of Data Backup Centre for China Seismograph Network and the data support to researches on the Wenchuan earthquake. *Chinese J Geophys* **52**: 1412—1417, doi: 10.3969/j.issn.0001—5733 (in Chinese with English abstract).

本文的译载由国家自然科学基金 (NSFC41322026) 资助

译自: *Earthq Sci*. 2011. **24**: 3—13

原题: Component azimuths of the CEArray stations estimated from P-wave particle motion

(中国科学院地质与地球物理研究所 李娟译; 吴何珍校)

译者简介



李娟(1975—), 女。中国科学院地质与地球物理研究所研究员, 中国科学院大学岗位教授。主要致力于地球深部结构和过程研究, 包括地幔转换带速度结构、地幔散射体探测、俯冲过程和地幔间断面的相互作用及其俯冲动力学过程等。电话: 010-82998446; 手机: 13521556858; E-mail: juanli@mail.iggcas.ac.cn.

伊朗中东部地区的地震动衰减关系

(Hosseyyn Hamzehloo Majid Mahood) 杨国栋,陈 瑶 译 (147)



活跃陆缘可致海啸的海底滑坡 (Kiichiro Kawamura

Jan Sverre Laberg Toshiya Kanamatsu) 朱超祁,贾永刚 译 (160)



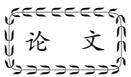
汪荣江博士获雷博伊尔-帕斯维茨奖..... 张 勇 译 (171)

第 3 期



根据震源机制确定应力场方法述评: 在 1980 年锡伦茨地震危机(上莱茵地堑)的应用

(Julie Maury François H. Cornet Louis Dorbath) 万永魁 译 (175)



按照数量、时间、空间和震级对地震预报的综合及分项评估

(Yosihiko Ogata Koichi Katsura Giuseppe Falcone Kazuyoshi Nanjo Jiancang Zhuang) 李 晶 译 (202)

中大地震应力降的全球变化

(Bettina P. Allmann Peter M. Shearer) 李万金 译 (219)

无人值守地震台站光伏自动追踪系统的设计 (Hongwei Peng Yujie Cheng

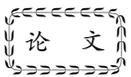
Zhiguo Hu Chuchen Zhang) 安容蒂,卢 山,赵龙梅,孙宏志 译 (247)

话说地震 (Ross S. Stein) 李 成 译 (253)



Don · L · 安德森(1933-2014) (Adam M. Dziewonski) 吴何珍 译 (262)

第 4 期



基于网络的加利福尼亚地震预警算法设计: ElarmS-2

(H. Serdar Kuyuk Richard M. Allen Holly Brown Margaret Hellweg

Ivan Henson Douglas Neuhauser) 张永刚,郝永梅,杜微译 (265)
 南美洲及周边洋盆的地壳和地幔顶部结构
 (Gary S. Chulick Shane Detweiler Walter D. Mooney) 薛彬译 (283)
 由金矿床证明的地震期间的瞬态蒸发
 (Dion K. Weatherley Richard W. Henley) 孙凤霞译 (310)
 日本 2011 年 3 月 11 日灾难性地震前地磁场长期变化的异常扰动
 (В. С. Исмагилов Ю. А. Копытенко Г. М. Попов) 王超译 (319)
 MSNoise: 利用地震背景噪声监测地震波速变化的 Python 程序包 (Thomas Lecocq
 Corentin Caudron Florent Brenguier) 安艳茹,张莹莹译 (326)
 基于微机电系统技术的微电化学地震传感器
 (Deyong Chen Guangbei Li Junbo Wang Jian Chen Wentao He
 Yunjie Fan Tao Deng Peng Wang) 孙宏志,安容蒂,卢山,赵龙梅译 (342)

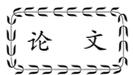


罗尔夫·迈斯纳 (1925—2014) 吴何珍译 (350)
 克劳德·弗洛伊德沃克斯 (1930—2015) 吕春来译 (353)

第 5-6 期



利用地球物理方法描绘地壳和岩石层地幔流体的分布
 (Martyn Unsworth Stéphane Rondenay) 郭春玲,刘雁冰译 (355)



地核内部的近赤道面各向异性
 (Tao Wang Xiaodong Song Han H Xia) 王涛,宋晓东,夏晗译 (404)
 地震: 灾害风险、检测、预警和研究
 (Peter Folger) 侯炳正译 (413)
 基础设施地震预警系统的范围分析 (Theresa J. Brown Andjelka Kelic
 Kevin L. Stamber Nancy S. Brodsky Eric D. Vugrin Thomas F. Corbet, Jr.
 William E. Fogleman Sharon L. O'Connor) 谢辉,李青梅译 (432)
 2008 年汶川地震产生的库仑应力演化及其对 2013 年 M_w 6.6 芦山地震的延迟触发
 (Yanzhao Wang Fan Wang Min Wang Zhengkang Shen
 Yongge Wan) 万永魁译 (443)
 利用 P 波质点运动估计“中国数字地震观测网络”地震计方位角
 (Fenglin Niu Juan Li) 李娟译 (454)

《世界地震译丛》征稿简则

1 本刊主要译载世界上地震学的新理论、新方法、新技术，要求来稿具有针对性(可引进)、及时性、先进性和权威性，并能用明白畅达的译文，忠实地传达原作的内容。

2 向本刊投稿，请将原文及 Word 文档录载的译文通过本刊电子信箱发送。选题一般可选最近一二年的研究成果。选题可由译者提供，也可由本刊编辑部推荐。欢迎投稿或来函联系。

3 外国人名一般都用原文，不必译出。外国地名必须按《世界地名译名手册》译出。如在该手册上查不到，可保留原文，不必勉强译出。

4 文稿中的计量一般用法定计量单位。外文字母、符号要按规定使用大小写，物理量用斜体；上下角标的字母、数码和符号为物理量时用斜体，否则用正体。

5 原文中的图例、图注等图中文字都需译出。将原图复制粘贴在相应位置，图的译文仿照原文放在下面的位置上。原文中的表用三线表，表题、表注和表内文字都需译出。

6 参考文献无需译出。最后请附详细译者简介。

7 译文一般由译者找人负责认真校对，在文字和专业等方面进行严格把关。经审定决定刊载的译文，我部将安排二校。如原译校稿质量很差，我刊将不予选用。

8 来稿请附原文或复印件；译文后边请注明译者的通讯地址、邮政编码、电话和全部译校者的身份证号码等。

9 来稿一般不退，请译作者自留底稿。若 3 个月内译者未接到刊用通知，请自行处理。

本刊联系电话：(010)68729337

本刊 E-mail: sjdzye@cea-igp. ac. cn

本刊编辑部