

王晓山,刁桂苓,王 焱等. 在地震预测研究中使用 GPS 和震源机制资料的问题探讨——与王秀文等商榷. 地球物理学报, 2011, **54**(11):2984~2990, DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2011.11.029

Wang X S, Diao G L, Wang Y, et al. Discussion on usage of GPS observational data and focal mechanism in earthquake prediction research—Comment on Wang Xiuwen's paper. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2011, **54**(11):2984~2990, DOI: 10.3969/j.issn.0001-5733.2011.11.029

在地震预测研究中使用 GPS 和 震源机制资料的问题探讨 ——与王秀文等商榷

王晓山^{1,2}, 刁桂苓^{2*}, 王 焱³, 马 栋², 冯向东², 杨雅琼²

1 中国地震局地球物理研究所, 北京 100081

2 河北省地震局, 石家庄 050021

3 山西省地震局大同地震台, 大同 037004

摘 要 针对“山西地区应力场变化与地震的关系”一文, 本文指出:(1)P 波初动存在误读的可能, 出现矛盾符号是正常的;(2)地震仪器极性也可能反向, 不校核可能会导致错误的震源机制解. 还讨论如何正确地表示震源机制随时间的变化. 分析认为 GPS 观测结果若不认真考虑观测误差、模型误差以及应变信息的层次, 所得结果可能会与震源机制解反演的区域构造应力场相矛盾. 比较了地震与 GPS 资料存在的差别和二者所提供信息的优劣后, 认为二者恰好可以互补. 利用 GPS 和地震两种资料联合反演、解释、相互约束, 则可增加反演结果的可靠性. 地震学和 GPS 观测两学科的交叉、融合必将有力地推动地学研究的深入.

关键词 震源机制, GPS, 应力场, P 波初动, 地震前兆, 地震预测

DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2011.11.029

中图分类号 P315

收稿日期 2011-03-15, 2011-09-25 收修定稿

Discussion on usage of GPS observational data and focal mechanism in earthquake prediction research —Comment on Wang Xiuwen's paper

WANG Xiao-Shan^{1,2}, DIAO Gui-Ling^{2*}, WANG Yan³, MA Dong²,
FENG Xiang-Dong², YANG Ya-Qiong²

1 *Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing 100081, China*

2 *Earthquake Administration of Hebei Province, Shijiazhuang 050021, China*

3 *Datong Seismic Station, Earthquake Administration of Shanxi Province, Datong 037004 China*

Abstract In view of “Research on relationship between stress field variation and earthquakes in Shanxi area”, this paper shows that 1. it is normal having inconsistent signs because there is some possibility of misreading the first motion polarity of P waveform; 2. the polarity of seismometer may be reserved, it would lead to wrong focal mechanisms if the polarity of seismometer is not corrected

基金项目 国家自然科学基金委“十一五”重大研究计划基金(90814002)资助.

作者简介 王晓山,男,1980 年出生,工程师,中国地震局地球物理研究所博士研究生,主要从事震源机制和应力场反演工作.

E-mail: wxs@eq-he. ac. cn

* **通讯作者** 刁桂苓,男,研究员,主要从事地震学方面的研究. E-mail: dgl@eq-he. ac. cn

when we use the first motion polarity to invert for focal mechanism. Moreover, we also discussed how to exactly display the temporal changes of focal mechanisms. Not consider seriously the observational error, model error and the level of strain information, the regional tectonic stress field derived from GPS data would be in contradiction with those from focal mechanisms. Through the comparison of the difference, advantage and disadvantage between seismic data and GPS data, we deem that they just can be complementary. Combined inversion, interpretation and mutual constraint of GPS data and seismic data will increase the reliability of inversion results. Cross-disciplinary integration between seismology and GPS will powerfully push the geosciences research forward.

Keywords Focal mechanism, GPS, Stress field, First motion of P waveform, Earthquake precursor, Earthquake prediction

1 引言

震源机制解资料已经成功地应用于推断东亚乃至全球构造应力场^[1,2],由 GPS 观测资料给出的中国大陆变形和运动特征同样得到了认可^[3,4].实际上,地震与 GPS 资料存在相当大的差别.地震是地下岩体的快速破裂,产生的地震波提供的是瞬时信息.地震震源深度从地表直到 700 多千米的深处,由于地震波能够穿透地球的各个层位,携带深部震源处和传播路径上的介质的信息,成为研究地球内部结构和认识地球内部自然现象的不可或缺的资料.但是天然地震的发生时间、空间分布存在严重的不均匀性,获取比较完整信息的希望遭遇到天然屏障. GPS 观测是测量地表观测点与卫星距离的信息,可以在满足基本观测条件的同时,兼顾均匀和针对特定部位密集布设,从而能在整体上了解全球板块、构造块体乃至断层两侧移动、变形的实际情况.然而, GPS 观测容易受地表直到大气层的各种因素干扰和影响,而且数据解算非常复杂,技术难度高,还没有发展到像地震学那样可以从地震图上直观地读取各种震相初动方向、到时、振幅和周期的程度.地震和 GPS 资料各具不同的优缺点,恰好能够互补,两个学科的交叉、融合,已经展现了较好的应用前景,联合使用两种观测资料用于局部构造应力场分析时,研究者倾向于力求两种资料反演结果的相互印证,而对于二者之间的矛盾之处鲜有报道.《地球物理学报》2010 年 53 卷 5 期发表王秀文等“山西地区应力场变化与地震的关系”一文^[5](以下简称文献[5]),给出了地震 P 波初动和 GPS 观测两种资料对山西地区应力场的分析结果.籍此,我们来比较 GPS 观测资料与震源机制结果的异同,探讨问题所在.

2 P 波初动和仪器极性问题的

王秀文等^[5]收集了 1970 年以来山西地区上万个单台 P 波初动符号,采用格点尝试法^[6]求解大量综合断面解.他们认为太原地区从 1973 年 P 轴方位开始趋势性偏转,持续 6 年,介休地震发生后,主压应力轴方位恢复到多年平均值;大同地区 1988 年 9 月至 1993 年小震综合断面解显示,1988 年 9 月至 1989 年 8 月近 1 年的时间内,P、T 两个主应力轴交替出现直立现象(即正断层和逆冲断层交替出现),在 1989 年 10 月大同地震前 4 个月恢复正常.太原、大同两个地区后期的综合断面解的主应力轴空间取向存在长时间稳定的现象,与华北地区构造应力场的主应力轴空间取向方向相同,只是早期出现短期变化.针对这种结果首先需要探讨初动符号的问题.

为识别初动,必须能说明信号是否存在.也就是说,需要一位信息.地震图 $f(t)$ 中的信息量可以用存储它所需要的存储器位数来度量.根据 Shannon^[7]的观点,当信号和噪声都是有限宽度的白噪声时,地震图 $f(t)$ 中有用信息的极限量由下式给出:

$$W T \log_2 \frac{S^2 + N^2}{N^2}, \quad (1)$$

式中 S^2 和 N^2 分别表示信号和噪声的功率, W 表示地震图 $f(t)$ 中不包含高于 W 赫兹的频率成分, T 为地震图 $f(t)$ 的时间长度(以 s 为单位).利用(1)式, Pakiser 和 Steinhart^[8]提出,由于

$$\Delta t = \frac{1}{W \log_2 \left(1 + \frac{S^2}{N^2} \right)}, \quad (2)$$

给出的时间长度 Δt 中包含了一位信息, Δt 可被认为是测量初动到时中误差的度量.测量初动到时的

误差反比于频率带宽,而误差以对数形式依赖于信噪比.

Aki^[9]选择一些低噪声的地方震记录,并把它们与计算机产生的具有各种均方振幅的噪声混合起来.测量输出结果,并把初动到时和极性的误差当作信噪比的函数来研究.结果显示:当初动的均方根信号振幅 S 为 P 波波组最大振幅的 $1/20$ 时,观测到时的误差对噪声谱的依赖关系与根据(2)式计算得到的依赖关系吻合得最好.也就是说,“初动”的信号水平约为 P 波波组最大振幅的 $1/20$.

关于读取初动的误差问题,发现了一个很有意义的结果:当噪声水平很高时,错误读取初动方向的概率可超过 0.5.这种情况下,与地震学家所读取的初动方向相反的方向可能是对的.其理由也许是:在大多数情况下,P 波的第二个半周的振幅大于第一个半周的振幅^[10].

数字地震波形允许拉伸放大观察波形的细节特征,当初动振幅较弱时,很容易与同时放大的地脉动混淆,可能导致对初动方向的辨认错误.P 波初动数据是求解震源机制和应力场的重要数据源,如果初

动极性存在问题,则会对震源机制和应力场的正确求解造成影响.由 P 波初动极性求震源机制解存在矛盾符号是正常的,当然矛盾符号占全部符号的比例越小越好,一般不超过 $1/4$.

地震仪器有三分向(NS、EW、UD)记录,也有单分向(UD)记录,仪器极性倒转会导致 P 波初动反向.因此,利用 P 波初动反演震源机制解需要核对仪器极性是否正确.通常可以由全球的远震和深震来检验,当震源机制基本确定后,地震记录三分量初至 P 波初动方向存在确定的关系.而远震和深震记录的 P 波初动比较清晰,易于准确辨认,为我们检验台站地震仪记录状况提供了可靠的信息.大同地震遥测台网从 1988 年 9 月开始运行,至 1989 年 10 月大同震群发生之前可以找到 2 次地震作为校核的对象.表 1 中两次地震参数取自哥伦比亚大学拉蒙特-多赫蒂地球观象台 Global Centroid Moment Tensor database (<http://www.globalcmt.org/CMTsearch.html>[2011-02-23]).针对表 1 中的两次地震,大同地震台网各个台站的方位角、离源角计算结果见表 2.

表 1 校核大同台网垂直向 P 波初动方向的地震震源参数

Table 1 Source parameters for checking P-wave first motion of Datong seismic network

日期	纬度/(°N)	经度/(°E)	深度 h /km	M_w	走向 1/(°)	倾角 1/(°)	滑动角 1/(°)	走向 2/(°)	倾角 2/(°)	滑动角 2/(°)
1988-09-07	30.14	137.21	490.7	6.6	26	45	166	126	80	46
1988-11-06	23.00	99.68	15.0	7.0	333	78	174	64	84	12

表 2 大同台网各个台站垂直向 P 波初动及其方位角、离源角

Table 2 P-wave first motion, azimuth and take-off angle of Datong seismic network

	台站	方位角/(°)	离源角/(°)	P 初动
日本深震	阳原	303.7095	57.9509	+
	天镇	304.7034	57.8582	+
	恒山	302.6471	57.8482	+
	应县	302.1234	57.6937	+
	山自皂 UD	303.7095	57.7766	+
	山自皂 NS			-
	山自皂 EW			-
澜沧地震	阳原	32.6157	34.4135	-
	天镇	31.7633	34.3086	-
	恒山	32.4130	34.5693	-
	应县	31.7867	34.6647	+
	山自皂	31.6498	34.4579	-
	右玉	29.4122	34.6877	+

图 1 是大同台网各个台站 P 波初动符号在震源机制解上的投影.图 1a 是日本深震,P 波初动符号全部为正,投影落在压缩区,应当是正确的,但是山自皂台的三分向中 NS、EW 向是错误的;图 1b 是澜沧地震,P 波初动符号处于膨胀区,应全部为负,但应县台和右玉台 P 波初动符号为正,显然错误.如此看来大同台网开始运行时,仪器垂直向极性正确,但在 1988 年 11 月起码有 2 个台垂直向极性错误.非常遗憾的是,查阅大同台网观测日志及维修记录,未发现调整仪器极性的相关内容.根据当时台网仪器维护的多位工作人员回忆,的确存在记录反向的问题,但是没有相关的文档记载.

刘巍等^[11]利用大同台网地震记录的 P 波初动资料研究大同地震前后震源应力场的变化过程,发现震中距小于 60 km 的浑源、应县、阳原等 3 个地震子台在地震前 14 个月分别出现主应力轴转向,大同、右玉、天镇地震台主震前 P 轴方位没有发生变化,位于震中地区的山自皂地震子台也没有出现主

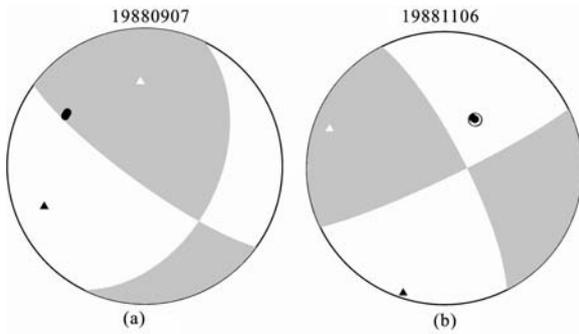


图1 大同台网 P 波初动在震源机制解的投影. 图中阴影区为压缩区, 实心圆表示 P 波初动向上, 空心圆表示 P 波初动向下. 黑色三角形为 P 轴, 白色三角形为 T 轴.

(a) 日本深震; (b) 澜沧地震

Fig. 1 The projection of P-wave first motion of Datong seismic network in focal mechanism solution. Compressional quadrants are shown shaded, solid circle marks positive P-wave first motions, whereas the open circle marks negative ones. Solid triangle represents P axis, open triangle represents T axis. (a) Japan earthquake; (b) Lancang earthquake

应力轴转向的现象, 而且两个主应力轴方位、倾角都与华北区域应力场的结果完全一致. 1991 年地震前没有出现上述变化现象. 震前发生主应力轴转向的浑源、应县、阳原 3 个台, 其中应县台与本文校核仪器极性存在的问题一致, 但是阳原台又不同, 或许观测系统进行过频繁调整. 因此我们有理由怀疑文献[5]给出 1989 年 10 月大同地震震前应力场变化的可靠性.

受方向稳定的区域构造应力场制约, 文献[5]给出的大同地区多年的综合断层解主应力轴的空间取向非常稳定, 仅在大同地震前 1 年多的时间内, 震源区附近应力主轴发生频繁的近 90° 偏转, 是十分困难的事情. 况且大同地震序列的 4 级以上地震的震源机制非常一致, 与序列中最大地震相同, 完全符合构造应力场的作用^[12], 难以理解震前正断层与逆冲类型应力场交替转换的现象. 同样地, 震源机制解一致性参数在 1999 年大同地震晚期强余震前 8 个月出现显著的下降, 存在趋于构造应力场主应力轴空间取向一致的现象^[13], 与文献[5]由 GPS 观测资料反演的结果也不相同.

对山西断陷带构造应力场的研究已有大量成果, 李钦祖^[14]综合分析强震的震源机制、地表破裂带、地震变形、内圈等震线长轴资料, 认为华北存在方向统一而稳定的应力场, 最大压应力主轴 σ_1 (P) 方位 NEE, 最小压应力主轴 σ_3 (T) 方位 NNW, 而且二者近水平状态; 中等压应力主轴 σ_2 (B) 垂直; 优势

破裂面方位 NNE 和 NNW 都是直立的; 许忠淮等由多个小地震推断的华北地区构造应力场的方向与其相同^[15], 还发现晋南地区地震可能是张性正断层活动为主; 成尔林等强调 NNW-SSE 向主张应力的作用^[16]; 刘巍等根据大量第一手地震资料得到的结果则强调了山西局部应力场在 NNW-SSE 向的拉张作用, 以及整体上与华北地区构造应力场的一致性^[17].

3 震源机制差别的表示

震源机制中的应力轴和节面参数是由球坐标表示的, 比较不同震源机制的差别最直观的应当在球面上进行. 比较两次地震震源机制的应力轴, 可以将震源球叠加, 然后量取两个应力轴的夹角, 应力轴都是过球心的, 它们的夹角不超过 90° . 文献[5]中将两个应力轴参数分开作图, 容易造成读者理解上的困难.

震源机制解较多时, 分析它们随时间的变化特征可以先进行分类, 再分析类型随时间、空间的变化, 使问题简化. 目前震源机制解分类的方法很多: 直接比较 3 个应力轴的倾角哪个更接近直立, 压应力轴直立为正断层, 张应力轴直立为逆冲断层, 中等应力轴直立为走向滑动断层^[18]; 其他方法有震源机制解三角形分类^[19]、系统聚类方法^[20]和震源机制与应力场一致性参数^[21]等.

4 GPS 结果对比及其可靠性分析

文献[5]以 2002~2006 年山西断陷带的运动速率为背景进行约束, 进而分离出 2007 年的偏离位移, 由偏离位移产生的表征动力特征的主应变场张应变方向 NE-NNE, 压应变方向 NW-NWW, 压应变强于张应变. 与郭良迁等^[22]分析相同区域 2007~2009 年的应变场, 大同盆地和忻代盆地南压北张, 太原盆地主应变率内小外大, 临汾盆地北压南张的结果不一致; 也和杨国华等^[23]根据华北 3 期 GPS 观测资料分析得到的山西 1999~2007 年的水平主应变率场方向相反. 那么文献[5]给出的 2007 年的应力场变化不是稳定和持续的现象, 偏离应变场实际上是基础应变场之上叠加的具有暂态性质的扰动应变场, 不是趋势性的区域应变场¹⁾.

1) 杨国华个人通信.

文献[5]对 GPS 分析结果认为:山西断陷带近期主要受控于 NWW-SEE 向的压应力场、NNE-SSW 向张应力场. 在这一背景下,不同时间段的运动特征是不同的:1996~1997 年相对平稳,1997~1998 年运动量级加大,1998~1999 年相对于上一年是反向运动;而 1999 年大同地震是在这个反向运动过程之后发生的.

利用山西数字地震台网记录的地震波形,读取垂直向的 \bar{P} 、 \bar{S} 最大振幅数据和初动极性,反演得到 2007 年以来大量中小地震的震源机制解^[24]. 比照文献[5]由 GPS 分析的张、压应力幅度的差别,将山西断陷带划分为 3 个分区,利用 FMSI 方法^[25]分别反演了 3 个分区的构造应力场(图 2). 3 个分区的最小压应力轴方位都是 NW-SE 向,最大压应力轴方位都是 NE-SW 向,并且最小压应力轴的倾伏角小于最大压应力轴,表明具有拉张成分,未出现利于文献[5]强调的“NWW-SEE 向的压应力场、NNE-SSW 向张应力场”现象的条件. 从文献[5]图 6 可以看出 2007 年最大的偏离性位移站点分布在山西断陷带的边缘,位移方向背离断陷带,应当属于拉张性质的表现,而与文献[5]图 7 主应变场挤压方向相反,不知可做何解释.

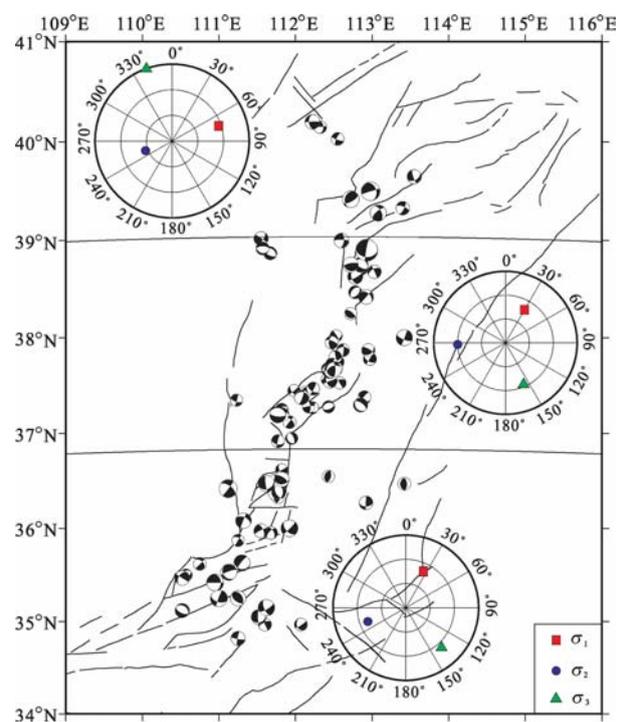


图 2 山西 2007~2010 年震源机制和应力场应力主轴的投影,断裂数据取自邓起东等^[26]

Fig. 2 The projection of focal mechanism and stress axis of Shanxi province from 2007 to 2010, the fault data from Deng Qidong et al. ^[26]

华北地区布设了研究地壳形变的 GPS 观测站 400 余座,密度目前居全国之首. 一个众所周知的事实是尽管华北地区历史上地震活动较为频繁,但地壳变形却是一个相对较弱的地区,该地区在空间上的趋势性应变率一般为 10^{-9} /a 量级. 虽然按测站的密度可以捕捉到较高频次的信息,但这一频次的信息和观测误差是同等程度的,因此很难分辨或提取,同时也难以把握区域的整体变化形态^[23]. 杨国华等²⁾详细论证了连续 GPS 观测数据中的噪声和影响因素,其中包括:白噪声、年度变化、海潮、大气负荷、积雪及土壤水、海洋非潮汐负荷、地球自转和突变现象. 最大幅度往往超过误差,持续时间或长或短. 这就提示:不论是运动场或是位移场都是相对的,存在多解性问题. 类似于山西断陷带每年观测一次(仅几昼夜)的 GPS 资料需要详细地进行误差分析. 由于山西 GPS 测网呈带状分布,一般来说模型误差相对较大;一年尺度结果的观测误差也比较大. 在此基础上究竟能够提供什么数量级的应变信息为区域分析所用需要认真对待.

5 讨论和结论

地震波的极性表征了地球介质的运动轨迹,是一张地震记录图中提供的重要信息之一. 地震波极性的准确性是保证基于“坐标旋转”的地表运动信号分析的基础. 地震波极性异常会导致接收函数、各向异性、矩张量反演等现代地震学研究结果不可靠;仪器的方位偏差更是仪器安装过程中的一个常见因素,特别是仪器水平 N 和 E 分量与地理北、东方位的偏差. 钮凤林等^[27]通过对“中国数字地震观测网络”一年的远场 P 波极性分析,给出了 803 个宽频带地震台的方位估计. 结果表明约有 270 个台站存在仪器方位偏差 $\geq 8^\circ$ 、或者分量混淆、或者极性反转等问题,为开展地震各向异性、接收函数等基于“坐标旋转”的定量地震学研究提供校正参考,对于 CAP^[28, 29]、Smoke 方法^[30]等使用波形反演震源机制时更应注意.

许忠淮等在研究了华北地区构造应力场之后指出^[15]:若某区的应力场是完全均匀的,则全区任一应力轨迹线皆应是平行的;应力线完全是平行的区域内部是不可能存在有相对应力集中区的;反之,任何应

2) 杨国华,杨 博,武艳强等. GPS 后期数据处理与地壳形变信息提取. 会议报告材料(PPT). 2010. 5. 6

力集中区的出现必然要伴随着应力轨迹线相对于平行线的某种偏离. 如果应力轴方向可能有些偏转, 这种偏转也应与应力大小在全区的不均匀分布有某种联系, 搞清这种联系意义重大. 然而尚未发现山西断陷带乃至华北地区应力方向分布的严重不均匀性. 在现有计算方法的精度下, 尚未发现地震带的存在已对应力场产生了明显的扰动.

文献[5]分析了山西断陷带 GPS 地震形变监测网 1996 年开始观测以来各个时期的变化, 读者也需要了解长期基本稳定的应变场形态. 变化应当是相对基本形态的短期、局部现象; 也有受固定因素影响的周期性演变. 对此要下大力气研究, 只有正确认识正常状态, 才能准确区分异常, 不必急于苛求提取“地震前兆”. 虽然朱守彪等^[31]认为“GPS 观测计算应变率的误差主要决定于 GPS 观测速度的误差”的认识并不完整, 但是他们认为“在变形小的中国东部地区目前 GPS 的观测精度还不能完全满足地应变率精确计算的要求”的观点, 需要格外重视; 另外, 站点分布等模型误差也不容忽视³⁾. 可能 GPS 观测应用于华北地区的地震预测需要等待积累更多的资料、提高观测的精度、使用改进了的分析方法^[32, 33]. 既然已经掌握 GPS 和地震两种资料, 最好利用 2 种信息联合反演、解释, 相互约束以增加结果的可靠性.

致谢 与杨国华研究员、江在森研究员的交流使作者受益匪浅, 周云好研究员、万永革教授提出了宝贵的意见和建议, 工作得到了李延兴研究员、李钦祖研究员、许忠淮研究员和王琪研究员的支持, 刘巍研究员和薛振跃、金文臣提供大同台网的相关信息, 宋美琴提供山西地震波形资料, 在此一并表示诚挚的感谢.

参考文献 (References)

- [1] 许忠淮. 东亚地区现今构造应力图的编制. 地震学报, 2001, **23**(5): 492~501
Xu Z H. A present-day tectonic stress map for eastern Asia region. *Acta Seismologica Sinica* (in Chinese), 2001, **23**(5): 492~501
- [2] Zoback M L, Zoback M D, Adams J, et al. Global patterns of tectonic stress. *Nature*, 1989, **341**(6240): 291~298
- [3] Wang Q, Zhang P Z, Freymueller J T, et al. Present-day crustal deformation in China constrained by GPS measurements. *Science*, 2001, **294**(5542): 574~577
- [4] Li Y X, Yang G H, Li Z, et al. Movement and strain

conditions of active blocks in the Chinese mainland. *Science China Earth Sciences*, 2003, **46**(Suppl.): 82~117

- [5] 王秀文, 宋美琴, 杨国华等. 山西地区应力场变化与地震的关系. 地球物理学报, 2010, **53**(5): 1127~1133
Wang X W, Song M Q, Yang G H, et al. Research on relationship between stress field variation and earthquakes in Shanxi area, China. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2010, **53**(5): 1127~1133
- [6] 许向彤, 许忠淮, 张东宁. 求震源机制 P 波初动解的格点尝试概率法. 地震地磁观测与研究, 1996, **16**(4): 34~42
Xu X T, Xu Z H, Zhang D N. A probabilistic grid test method of determining earthquake focal mechanism using P-wave onset polarity data. *Seismological and Geomagnetic Observation and Research* (in Chinese), 1996, **16**(4): 34~42
- [7] Shannon C E. *The Mathematical Theory of Communication*. Champaign: University of Illinois Press, 1949
- [8] Pakiser L C, Steinhart J S. *Explosion Seismology in the Western Hemisphere*. In: Odishaw H, ed. *Research in Geophysics*. Cambridge: M. I. T. Press, 1964
- [9] Aki K. *Signal to Noise Ratio in Seismic Measurements*. In: Aoki H, Iizuka S, eds. *Volcanoes and Tectonosphere*. Tokyo: Tokai University Press, 1976
- [10] Aki K, Richards P G. *Quantitative Seismology: Theory and Methods*. San Francisco: W. H. Freeman and Company, 1980. 576~579
- [11] 刘巍, 王赵丽, 孟雁英. 大同—阳高 2 次地震前后震源应力场的变化过程. 山西地震, 1994, (4): 33~39
Liu W, Wang Z L, Meng Y Y. Change process of the focal stress field before and after 2 Datong-Yanggao earthquakes. *Earthquake Research in Shanxi* (in Chinese), 1994, (4): 33~39
- [12] 张四昌, 刁桂苓, 于利民. 1989 年大同—阳高地震序列的破裂特征. 地震学报, 1993, **15**(增刊): 528~534
Zhang S C, Diao G L, Yu L M. Fracture feature of 1989 Datong-Yanggao Earthquake. *Acta Seismologica Sinica* (in Chinese), 1993, **15**(Suppl.): 528~534
- [13] 刁桂苓, 赵英萍, 啜永清等. 大同晚期强余震前震源机制解的一致性特征. 内陆地震, 2004, **18**(3): 202~206
Diao G L, Zhao Y P, Chuo Y Q, et al. Coherence characteristics of focal mechanism solutions of later-period strong aftershocks. *Inland Earthquake* (in Chinese), 2004, **18**(3): 202~206
- [14] 李钦祖. 华北地壳应力场的基本特征. 地球物理学报, 1980, **23**(4): 376~388
Li Q Z. General features of the stress field in the crust of north China. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 1980, **23**(4): 376~388
- [15] 许忠淮, 阎明, 赵仲和. 由多个小地震推断的华北地区构造应力场的方向. 地震学报, 1983, **5**(3): 268~279
Xu Z H, Yan M, Zhao Z H. Evaluation of the direction of tectonic stress in north China from recorded data of a large

3) 杨国华个人通信.

- number of small earthquakes. *Acta Seismologica Sinica* (in Chinese), 1983, **5**(3): 268~279
- [16] 成尔林, 张美芳. 山西地堑系现代北西—北北西向拉张应力场. *西北地震学报*, 1990, **12**(4): 20~25
Cheng E L, Zhang M F. Modern NW-NNW tension stress field of rift valley series in Shanxi province. *Northwestern Seismological Journal* (in Chinese), 1990, **12**(4): 20~25
- [17] 刘巍, 赵新平, 安卫平等. 山西地区的地壳应力场. *山西地震*, 1993, (3): 3~11
Liu W, Zhao X P, An W P, et al. The crustal stress field in Shanxi province. *Earthquake Research in Shanxi* (in Chinese), 1993, (3): 3~11
- [18] 刁桂苓, 徐锡伟, 陈于高等. 汶川 $M_w7.9$ 和集集 $M_w7.6$ 地震前应力场转换现象及其可能的前兆意义. *地球物理学报*, 2011, **54**(1): 128~136
Diao G L, Xu X W, Chen Y G, et al. The precursory significance of tectonic stress field transformation before the Wenchuan $M_w7.9$ earthquake and the Chi-Chi $M_w7.6$ earthquake. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2011, **54**(1): 128~136
- [19] Frohlich C. Triangle diagrams: ternary graphs to display similarity and diversity of earthquake focal mechanisms. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 1992, **75**(1-3): 193~198
- [20] 刁桂苓, 于利民, 李钦祖. 震源机制解的系统聚类分析—以海城地震序列为例. *中国地震*, 1992, (3): 86~92
Diao G L, Yu L M, Li Q Z. Hierarchical clustering analysis of the focal mechanism solution-taking the Haicheng earthquake sequences for example. *Earthquake Research in China* (in Chinese), 1992, (3): 86~92
- [21] 王俊国, 刁桂苓. 千岛岛弧大震前哈佛大学矩心矩张量(CMT)解一致性的预测意义. *地震学报*, 2005, **27**(2): 178~183
Wang J G, Diao G L. Consistent CMT solutions from Harvard university before the great earthquakes in Kurile islands and its significance for earthquake prediction. *Acta Seismologica Sinica* (in Chinese), 2005, **27**(2): 178~183
- [22] 郭良迁, 占伟, 杨国华等. 山西断陷带的近期位移和应变率特征. *大地测量与地球动力学*, 2010, **30**(4): 36~42
Guo L Q, Zhan W, Yang G H, et al. Short-term displacement and characteristics of strain rate of Shanxi fault subsidence zone. *Journal of Geodesy and Geodynamics* (in Chinese), 2010, **30**(4): 36~42
- [23] 杨国华, 韩月萍, 杨博等. 华北地区最近几年水平形变场的含义与讨论. *山东科技大学学报(自然科学版)*, 2009, **28**(6): 1~8
Yang G H, Han Y P, Yang B, et al. Meanings and discussion on the horizontal deformation fields in north China in recent years. *Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science)* (in Chinese), 2009, **28**(6): 1~8
- [24] 梁尚鸿, 李幼铭, 束沛镒等. 利用区域地震台网P、S振幅比资料测定小震震源参数. *地球物理学报*, 1984, **27**(3): 249~256
Liang S H, Li Y M, Shu P Y, et al. On the determining of source parameters of small earthquakes by using amplitude ratios of P and S from regional network observations. *Chinese J. Geophys. (Acta Geophysica Sinica)* (in Chinese), 1984, **27**(3): 249~256
- [25] Gephart J W. FMSI: A fortran program for inverting fault/slickenside and earthquake focal mechanism data to obtain the regional stress tensor. *Computers & Geosciences*, 1990, **16**(7): 953~989
- [26] 邓起东, 冉永康, 杨晓平等. 中国活动构造图. 北京: 地震出版社, 2007
Deng Q D, Ran Y K, Yang X P, et al. Map of Active Tectonics in China (in Chinese). Beijing: Seismological Press, 2007
- [27] Niu F L, Li J. Component azimuths of the CEArray stations estimated from P-wave particle motion. *Earthquake Science*, 2011, **24**(1): 3~13
- [28] Zhao L S, Helmberger D V. Source estimation from broadband regional seismograms. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 1994, **84**: 91~104
- [29] Zhu L P, Helmberger D V. Advancement in source estimation techniques using broadband regional seismograms. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 1996, **86**(5): 1634~1641
- [30] Sonke J A, Munsey J W, Teague A G, et al. A program for focal mechanism determination by combined use of polarity and SV-P amplitude ratio data. *Earthquake Notes*, 1984, **55**(3): 15
- [31] 朱守彪, 石耀霖. 由GPS站点速度观测误差引起的应变率计算结果的误差分析. *大地测量与地球动力学*, 2007, **27**(6): 51~57
Zhu S B, Shi Y L. Error analysis of strain rates resulted from errors of GPS measurement. *Journal of Geodesy and Geodynamics* (in Chinese), 2007, **27**(6): 51~57
- [32] 杨国华, 武艳强, 杨博等. 应变计算与分析的若干问题及有关偏差的修正. *大地测量与地球动力学*, 2010, **30**(4): 59~63
Yang G H, Wu Y Q, Yang B, et al. Several problems of strain calculation analysis and the correction of related deviation. *Journal of Geodesy and Geodynamics* (in Chinese), 2010, **30**(4): 59~63
- [33] 杨博, 张风霜, 占伟等. 水平运动场滤波试验与应变计算. *大地测量与地球动力学*, 2010, **30**(5): 106~111
Yang B, Zhang F S, Zhan W, et al. Experiment for filtering horizontal movement field and its strain calculation. *Journal of Geodesy and Geodynamics* (in Chinese), 2010, **30**(5): 106~111