

文章编号: 0253-3782(2006)05-0478-07

用 GPS 时间序列获取中国大陆 微动态应变场^{*}

敬少群¹⁾, ^{*} 王佳卫¹⁾ 吴 云²⁾ 周硕愚²⁾ 施顺英²⁾

1) 中国长沙 410001 湖南省地震局

2) 中国武汉 430071 中国地震局地震研究所

摘要 基于中国大陆 GPS 观测在国际地球参考框架 (ITRF) 获得的站点位置, 由三角形法通过反演逐年推算中国大陆年微动态应变场。结果显示, 研究区年微动态应变场大致以南北地震带为界。西部地区存在方向大体一致的年主压应变优势分布方向, 方向自西向东、由近南北向转为北东向, 与近代应变场的方向一致, 表明西部地区变形主要是由印度板块向北推进和西伯利亚地块相对南推形成的, 且整体上仍是新构造运动的继承; 东部大部分地区不存在年主应变的优势分布方向。年最大剪应变在不同地区差别很大, 变化范围从 $4.13 \times 10^{-8} \sim 7.0 \times 10^{-10}$, 总体上西部大于东部。同一区域年最大剪应变的多年变化表明, 西部变化大, 东部变化平缓。年面膨胀显示, 研究区大部分为压缩区, 且同一区域的多年变化平缓。

关键词 GPS 时间序列 微动态应变场 年应变场

中图分类号: P315.72⁺⁷ **文献标识码:** A

引言

近 20 年来, 随着空间大地测量技术的不断发展, 利用空间对地观测技术监测全球现代地壳运动取得了长足进展, 使进行现今地壳运动与现今地球动力学研究成为可能。在中国大陆及邻区大范围内开展的连续 GPS 空间对地观测也为我们研究观测区现今地壳的微动态构造应变场创造了条件。所谓构造微动态, 是指以现代地壳运动与地球动力学所阐述的构造框架和动力学基本原理为基础, 着重研究现今运动与地质时间尺度所确定出的继承性的稳定基础的“偏差”及随时间的变化过程。

地壳运动微动态的思想早见于 1994 年, 当时的马宗晋和杜品仁 (1995)、周硕愚 (1994, 1999) 就从不同的视角分别提出过研究现今地球和现今地壳微动态的倡议。希望通过微动态、微韵律、暂态等非平稳、非线性时空过程的揭示, 逐步建立相对于常态模型的微动态过程模型并研究其微动力学。认为这可能有助于将现代地壳运动推进到现今(时)地壳运动研究的新阶段, 并可望推进灾害动力学与地震预报研究。显然这要求以坐标框架统一的、大尺度空间分布的、多台站精确的时间序列观测为基础条件。但此条件在过去是难以满足的, 因此到目前为止, 有关地壳运动微动态提法的研究并不多见, 而关于微动态应变场的

* 国家自然科学基金项目 (40074024) 资助。

2006-01-11 收到初稿, 2006-06-14 决定采用修改稿。

◆ 通讯作者。E-mail: jingshq@yahoo.com.cn

研究则更少. 本研究旨在这一方面做些有益的探索. 利用 2000 年 1 月 1 日—2004 年 12 月 31 日我国 GPS 网络工程 25 个基准站连续观测解算的站点坐标时间序列, 获取我国大陆这期间每一年的应变场微动态, 以下简称年微动态应变场.

1 资料的使用与方法的选取

1.1 GPS 时间序列的获取

本研究所使用的数据由中国地震局地震预测研究所王敏研究员提供. 这些数据采用 GAMIT/GLOBK 软件对基准站 GPS 原始观测数据进行处理, 然后再作整体平差得到. 有关数据处理方法、主要过程、精度分析详见顾国华等(2001)文章; 有关网络 25 个基准站的详细情况见牛之俊(2002)文章.

1.2 方法的选取与网格的划分

研究采用三角形法计算地应变. 以基准站为顶点, 按照各基准站就近连线组成网格的原则构建三角网. 伍吉仓等(2003)的研究显示, 在采用三角形法计算地应变时, 三角形形状因子的阈值应控制在 0.1~0.36 之间. 只有形状因子大于阈值的三角形才可用于计算地应变分量, 且计算得到的地应变一般能与观测值的精度保持大致相同的水平. 顾及到三角形形状对计算地应变分量精度的影响, 本研究最终将研究区划分为 30 个三角形, 各三角形的组成情况及其形状因子见表 1.

表 1 三角形网格的组成情况及其形状因子

三角形 网格 编号	三角形顶点 站名	形状 因子	精度估计/ 10^{-8}		三角形 网格 编号	三角形顶点 站名	形状 因子	精度估计/ 10^{-8}	
			m_{EW}	m_{NS}				m_{EW}	m_{NS}
0	TASH_DLHA_LHAS	0.39	0.26	0.36	15	KMIN_LUZH_QION	0.30	0.65	0.45
1	TASH_WUSH_DLHA	0.14	0.26	0.34	16	LUZH_GUAA_QION	0.36	0.36	0.20
2	WUSH_URUM_DLHA	0.21	0.24	0.83	17	LUZH_XIAM_GUAA	0.18	0.32	0.62
3	URUM_DXIN_DLHA	0.34	0.15	0.57	18	LUZH_WUHN_XIAM	0.30	0.16	0.42
4	URUM_HLAR_DXIN	0.21	0.10	0.30	19	LUZH_XIAA_WUHN	0.45	0.33	0.52
5	DLHA_XNIN_LHAS	0.20	0.28	0.26	20	XIAA_SHAO_WUHN	0.16	0.45	1.00
6	DLHA_DXIN_XNIN	0.48	0.32	0.60	21	XIAA_TAIN_SHAO	0.29	0.14	0.80
7	DXIN_YANC-XNIN	0.42	0.23	0.24	22	XIAA_YANC_TAIN	0.36	0.23	0.92
8	DXIN_HLAR_YANC	0.32	0.21	0.21	23	YANC_BJFS_TAIN	0.33	0.25	0.56
9	LHAS_LUZH_XIGA	0.25	0.21	0.38	24	BJFS_CHUN_TAIN	0.25	0.36	0.14
10	LHAS_XNIN_LUZH	0.45	0.17	0.20	25	BJFS_HLAR_CHUN	0.44	0.19	0.24
11	XNIN_YANC_XIAA	0.37	0.21	0.30	26	XIAM_WUHN_SHAO	0.48	0.54	0.20
12	YANC_HLAR_BJFS	0.24	0.22	0.11	27	SHAO_TAIN_CHUN	0.29	0.30	0.15
13	XIGA_LUZH_KMIN	0.28	0.75	0.36	28	SHAO_CHUN_SUIY	0.17	0.48	0.24
14	XNIN_XIAA_LUZH	0.45	0.08	0.14	29	HLAR_CHUN_SUIY	0.25	0.42	0.45

1.3 基线向量的变化特征及微动态应变场研究步长的确定

由各 GPS 基准站站点坐标时间序列计算相应时间与三角形三边相应的基线向量时间序列. 基线向量消除了两站点间背景场的变化信息, 而只保存了各站点周围的局部变化信息及其所在地块的差异运动信息. 因此, 可以把基线向量的变化看成由两站点所处的构造单元因外界因素(如机械力、温度变化、电磁力、化学力)作用的差异引起的. 它直观地反映了基线向量沿经、纬方向的长度变化, 它是本文进行微动态应变场研究的基础.

为了确定计算微动态应变场应选择的最佳步长, 我们对构成 30 个三角形的 52 条基线向量时间序列的变化特征进行了分析, 所得结果见表 2. 基线向量的年伸缩量由基线的趋势变化获得, 拉张为正、缩短为负. 基线的年周期变化幅度由傅里叶分析方法计算, 未通过显著性检验的年周期变化, 在表中没有给出.

表 2 基线向量的年趋势变化和周期变化幅度

基线	趋势变化		年变幅		基线	趋势变化		年变幅	
	E-W /mm·a ⁻¹	N-S /mm·a ⁻¹	E-W /mm	N-S /mm		E-W /mm·a ⁻¹	N-S /mm·a ⁻¹	E-W /mm	N-S /mm
BJFS_CHUN	-4.4	-0.5	0.9	1.3	LUZH_XIAM	-1.5	3.6	0.6	
BJFS_HLAR	4.6	0.1	0.8	0.5	LUZH_XNIN	1.1	6.8	1.3 *	1.3
BJFS_YANC	-1.4	-0.8	1.2	0.6	QION_KMIN	-1.8	-8.8		1.2
BJFS_TAIN	0.3	1.7	1.1		SHAO_CHUN	6.7	2.8	0.9	1 *
CHUN_TAIN	4.8	1.1	1.2	0.6 *	SHAO_SUIY	6.6	0.7	1.1 *	1.1 *
DLHA_LHAS	13.4	-15.9	3.2	1.1	SHAO_XIAA	2.3	7.9	1.9	1.1
DLHA_TASH	5.7	25.0	1.7		SHAO_XIAM	0.9	-0.1	2.1	0.9
DLHA_WUSH	1.6	16.4	2.2	1.2	SHAO_TAIN	2.0	1.9		
DLHA_XNIN	1.2	1.6	1.8	0.6	SHAO_WUHN	-0.3	0.5		1.2
DLHA_URUM	0.8	8.4	3.0	1.7	SUIY_CHUN	0.6	-1.8		0.4 *
DLHA_DXIN	2.2	-3.8	1.2		TAIN_CHUN	4.8	1.1	1.2	0.6 *
DXIN_URUM	-1.3	12.2	1.8	1.7	URUM_WUSH	0.8	-8.0	0.9	1.3
DXIN_XNIN	3.4	-2.2			WUHN_LUZH	-2.2	-4.2	1.9 *	1.3
DXIN_YANC	1.5	4.7	0.8	0.6	WUHN_XIAA	2.6	8.5	2.3	2.1
GUAN_LUZH	-0.8	1.5	1.6 *	1.5	WUHN_XIAM	0.6	-0.7		
GUAN_QION	1.4	-1.8		1 *	WUSH_TASH	4.1	-8.6		1.1
HLAR_CHUN	0.3	0.3	0.5		XIAA_TAIN	0.9	-6.3	1.9	1.1
HLAR_DXIN	-4.5	-5.4	1.6 *		XIAA_XNIN	-3.7	2.5	1.8 *	1
HLAR_SUIY	0.1	1.8	0.9 *	1	XIAA_YANC	-1.7	-4.4	0.8	0.6
HLAR_URUM	-5.9	-17.7	2.1		XIAG_KMIN	6.0	0.2	3.0	1.1
HLAR_YANC	6.0	-0.7	1.3 *		XIAM_GUAN	-0.8	-2.2	1.9	0.8
LHAS_XIAG	-17.8	32.3	4.0	1.5	XNIN_LHAS	-12.2	-17.5		1.4
LHAS_LUZH	-11.3	24.3	2.1	1.1	YANC_TAIN	-0.8	2.1		0.9
LHAS_TASH	19.1	9.2	1.7	1.8	YANC_XNIN	-2.0	-6.9		
LUZH_KMIN	-0.6	8.2	1.7	0.7	LUZH_XIAA	4.8	4.3	0.9	1.5
LUZH_QION	-2.3	-0.5	1.5	1.5	LUZH_XIAG	6.5	8.0	2.2	0.7

注: 表中带“*”的数字为通过显著性检验的半年周期变化振幅.

由表中数据可得, 69% 的基线向量的年伸缩量大于 1.3 mm/a(牛之俊等, 2002) 的精度底线, 31.7% 的基线向量存在显著的、有意义的(年变幅大于 1.3 mm) 年变化周期. 因此, 在下面的微动态应变场计算中, 我们选取以年为步长来研究观测区的年微动态应变场.

为避免某些不确定因素和小尺度变化信息引起的突跳对计算结果造成影响, 选取基线向量月均值作为基础数据, 计算基线的年变化. 本研究的年变化为当年 1~12 月的变化.

2 微动态应变场

2.1 主应变

由基线长度年变化按三角形法计算年主应变(顾国华, 孙汉荣, 1998), TAIN 站 2000 年, WUHN 站 2000 年. 2002 年因部分数据有问题, 当年度这两个站分属的三角形网格未

参加计算。图 1 显示的是按照石耀霖(2004)给出的方法计算的研究区研究时段多年平均主压应变方向分布。从图中可以看出, 西部块体的年最大主压应变方向具有很好的一致性, 自西向东最大主压应变方向由近南北向变为北东向; 东部块体的最大主压应变方向则显得有点凌乱, 但大致可分为 3 个区: 以东南沿海内地震带为界, 南部地区的最大主压应变方向为 WNW—NW 向; 北部的东北地块最大主压应变方向为 NE 向; 扬子、华北块体为 NW—NE 向。

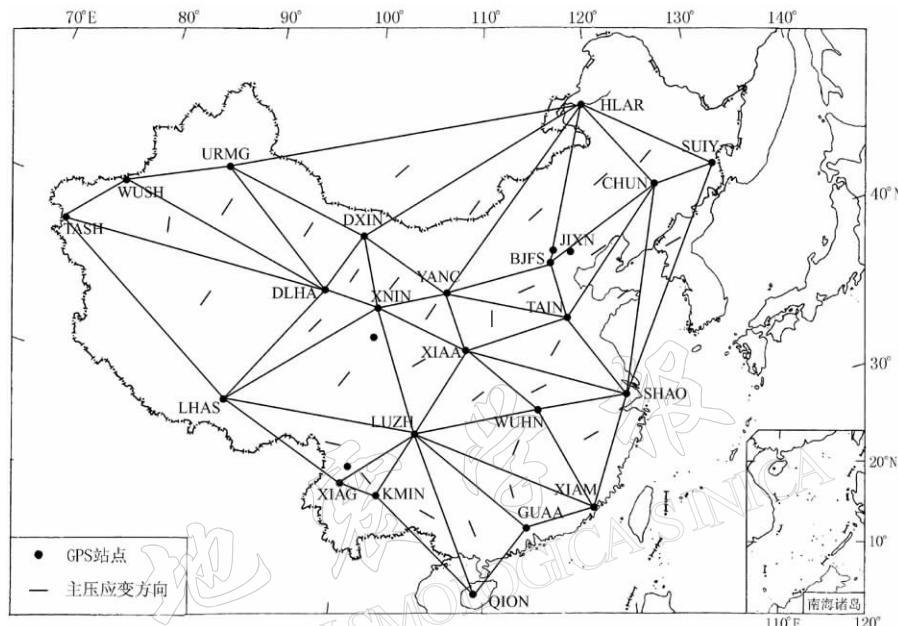


图 1 中国大陆及邻区研究时段平均主压应变方向分布

各网格连续 5 年的年最大主压应变方向显示, 西部地区存在明显的年最大主压应变优势分布方向, 且各年度的最大主压应变方向与平均主压应变方向的偏角最大不超过 10° ; 东部地区(除网格 15 外)则不存在明显的年最大主压应变优势分布方向, 各年度的最大主压应变方向与平均主压应变方向的偏角波动较大。网格 9, 13, 15 的年主压应变小于年主张应变, 呈张性。

2.2 年最大剪应变

用公式 $\gamma = \epsilon_1 - \epsilon_2$ 计算各三角形网格的年最大剪应变。结果显示, 各三角形网格同一年份的年最大剪应变在不同地区差别较大, 总体上西部地区大于东部地区。同一网格连续 5 年的年最大剪应变的波动幅度西部地区同样大于东部地区, 且最高可相差一个数量级。西部高值区主要分布在滇西南、青藏块体、祁连山附近; 东部的相对高值区则分布在南北地震带附近的网格、华北及东北很窄的地带(28, 29 号网格)。年剪应变最大值为 2001 年 10 号网格的 4.45×10^{-8} , 最小值为 2002 年 16 号网格的 7.0×10^{-10} 。相邻年份间年剪应变变幅最大的是 10 号网格, 2000 年为 2.21×10^{-8} , 2001 年为 4.45×10^{-8} , 变幅达 2.24×10^{-8} ; 变幅不足 10^{-10} 的有多个网格。

2.3 年面膨胀

用公式 $\gamma = \epsilon_1 + \epsilon_2$ 计算各三角形网格的年面膨胀。结果显示: 研究区大部分地区为压

缩区, 膨胀区主要分布在西藏的网格 9、滇西南的网格 13、华南地块的网格 15. 年面膨胀最大的为 2000 年 13 号网格的 2.62×10^{-8} , 最小的为 2003 年 26 号网格的 1×10^{-10} . 各三角网连续 5 年的年面膨胀相对变化平缓, 两相邻年份间的最大变幅不到 10^{-8} .

3 基本构造应力场与现今微动态应力场

印度洋板块、太平洋板块及菲律宾海板块对欧亚板块的推挤已经历了上亿年的时间, 并在欧亚板块内形成了一个基本构造应力场. 曾秋生等(1989)根据绝对应力测量、震源机制解、地形变测量等的研究成果给出的研究区应力场显示, 研究区应力场以水平作用力为主, 以南北地震带为界, 东西两部分的地壳应力活动明显不同, 西部地区, 自 20 世纪以来持续受到南北方向的挤压. 本文用 GPS 时间序列计算的微动态年主应变场的优势方向与曾秋生等(1989)的结果一致. 虽然西部地区在研究时段曾发生过多次 6 级、7 级地震, 但年主应变场的方向都没有大的变化. 正因为如此, 不同学者用不同资料采用不方法得到的主压应变方向都大体一致. 这也从一个方面说明, 研究区西部的应变场是长期在印度板块持续的向北推挤中形成的, 整体上仍是新构造运动的继承, 西部地震频繁也是这种推挤作用下的产物.

东部地区的区域应力场, 总体是近东西向的. 其中, 华北—东北地区以北东东—东西为主导, 而华南地区北西向占优势的特点十分明显(丁国瑜, 1991). 但在我们计算的微动态年应变场中, 除华南地区的 15 号网格外, 其它网格不存在年主应变方向的优势分布. 但平均主压应变方向在东北地块为 NE 向, 与蒋溥和戴丽思(1989)用震源机制解得到的结果大体一致. 而华南地区的 15, 16, 17 号网格 WNW—NW 向的平均主压应变方向也与大多数作者的结果一致. 具有年主压应变方向优势分布的区域, 可能是该区域存在统一的持续一致的外力作用的一个证明. 不存在年主应变方向优势分布的区域, 可能是这些地区并

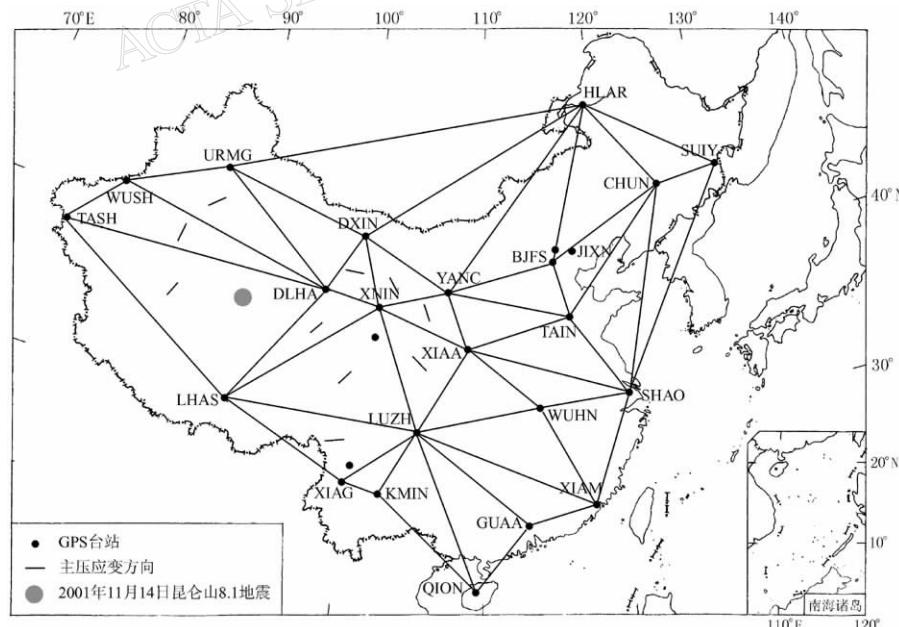


图 2 昆仑山口西 8.1 级地震前后的区域年主压应变场方向

没有受到持续一致的外力作用, 也可能是这些地区构造变化信息小, 被噪声掩盖所致。

4 地震对微动态应变场的影响

2001年11月14日, 昆仑山口西发生了8.1级地震。在地震孕育的过程中, 部分GPS基准站间的基线向量发生了异常变化(敬少群等, 2005), 导致由此计算的区域应变场发生变化。图2是2001年1—12月西部部分三角形网格最大主压应变方向分布图。可以看到, 大致以昆仑山断裂带为界, 北部应变场的最大主压应变轴为EW—WNW方向, 南部为NE向。结合2000—2004年平均最大主压应变方向的分布, 可以帮助我们更好地理解地震的孕育、发生过程(敬少群等, 2005)及震后的地表破裂形态(中国地震局, 2001)。

5 讨论和结论

1) 在本研究所采用的GPS基准站间52条基线向量中, 有69%的基线向量年伸缩量大于1.3 mm/a的精度底线, 31.7%的基线向量存在显著的有意义的(年变幅大于1.3 mm)年变化周期。因此, 选取以年为步长来计算研究区的微动态应变场。从所得的结果看, 以年为步长, 基本消除了地壳的年周期胀缩对微动态应变场的影响; 从计算所得的应变场精度(多年应变场的均方差, 表1)看, 虽然不同三角形网格之间存在差异, 但总体上离散程度不大, 结果能真实反映研究区的微动态应变信息。

2) 由研究区微动态应变场的图象可以看出: 西部地区存在方向大体一致的年主应变优势分布方向, 且与多年的平均主应变方向大体一致。所得到的主压应变方向与曾秋生等(1989)、李延兴等(2003)、杨少敏等(2005)利用不同方法得到的结果大体一致。这说明西部的变形主要由印度板块向北推进和西伯利亚地块相对向南挤压引起, 整体上仍是新构造运动的继承。东部地区不仅不存在统一的年主应变场, 且多年的年应变方向波动较大。其原因可能是东西两区动力作用联合、交替与消长的结果; 也可能是这些地区的构造变化信息小, 被噪声所掩盖。如果是后一种情况, 那么我们应选择多长的尺度来研究该区域的微动态应变场, 是一个值得讨论的问题。

3) 如果多年的平均应变场反映的是研究区应变场的背景信息, 那么在此基础上应变场的异常变化可能是区域应变场加强或改变的信号, 它可能对地震研究及预测具有参考价值, 昆仑山8.1级地震前后区域年应变场的变化就是证明。遗憾的是在我国连续GPS基准站分布稀疏, 且观测时间短, 而采用的三角形法实际上是假设研究区为均匀介质, 这就意味着我们得到的只是三角形网格的一个平均应变场。因此, 要获得真正意义上空间连续分布的微动态应变场就必须加大GPS站点观测密度。

参 考 文 献

- 丁国瑜. 1991. 中国岩石圈动力学概论——《中国岩石圈动力学地图集》说明书[M]. 北京: 地震出版社, 158~159
- 顾国华, 孙汉荣. 1998. 利用GPS地形变资料在大地坐标系中计算应变[J]. 地壳形变与地震, 18(3): 315~317
- 顾国华, 申旭辉, 王敏, 等. 2001. 中国大陆现今地壳水平运动基本特征[J]. 地震学报, 23(4): 362~369
- 蒋溥, 戴丽思. 1989. 震源断错和地震应力场[A]. 见: 马杏垣主编. 中国岩石圈动力学图集[C]. 北京: 中国地图出版社, 19
- 敬少群, 吴云, 乔学军, 等. 2005. GPS时间序列及其对昆仑山口8.1级地震的响应[J]. 地震学报, 27(4): 394~401
- 李延兴, 杨国华, 李智, 等. 2003. 中国大陆活动地块的运动与应变状态[J]. 中国科学(D辑), 33(增刊): 65~81

- 马宗晋, 杜品仁. 1995. 现今地壳运动问题[M]. 北京: 地质出版社, 1~2
- 牛之俊, 马宗晋, 陈鑫连, 等. 2002. 中国地壳运动观测网络[J]. 大地测量与地球动力学, 22(3): 88~94
- 石耀霖. 2004. 地应力主应力的方位角求和与平均[J]. 地震学报, 26(1): 106~109
- 伍吉仓, 邓康伟, 陈永奇. 2003. 三角形形状因子对地壳形变计算精度的影响[J]. 大地测量与地球动力学, 23(3): 26~30
- 杨少敏, 王琪, 游新兆. 2005. 中国现今地壳运动 GPS 速度场的连续变形分析[J]. 地震学报, 27(2): 128~138
- 曾秋生, 卞兆银, 业成之, 等. 1989. 板内块体的现代应力场[A]. 见: 马杏垣主编. 中国岩石圈动力学图集[C]. 北京: 中国地图出版社, 20
- 中国地震局. 2001. 中国昆仑山口西 8.1 级地震图集[M]. 北京: 地震出版社, 1~13
- 周硕愚. 1994. 努力创建地震预报的应用基础科学——兼论板内现今地壳运动动力学[J]. 地震学刊, 1(4): 12~14
- 周硕愚. 1999. 走向 21 世纪的地壳形变学——对大陆动力学与地震预报的新推动[J]. 地壳形变与地震, 19(1): 8~12

EVALUATION OF MICRO-BEHAVIOR OF STRAIN FIELD IN CHINESE MAINLAND WITH THE GPS TIME SERIES

Jing Shaoqun¹⁾ Wang Jiawei¹⁾ Wu Yun²⁾ Zhou Shuoyu²⁾ Shi Shunying²⁾

1) *Earthquake Administration of Hunan Province, Changsha 410001, China*

2) *Institute of Seismology, China Earthquake Administration, Wuhan 430071, China*

Abstract: Based on the time series of GPS station coordinate in the international earth reference frame, we evaluate annual micro-behavior of strain field in Chinese mainland with the triangle method. The results show that the annual micro-behavior of strain field is divided into two parts by the north-south earthquake belt in the research region. The prevailing direction of the compressive principal strain field is nearly consistent in the western region. From west to east, the direction varies from NS to NE. It is in accordance with the direction of the modern compressive principal strain field. This suggests that geologic deformation in western region was mainly caused by that India tectonic plate pushes the research region northward and the Siberia plate pushes it southward relatively. It is an inheritance of new tectonic motion. The prevailing direction of the principal compressive strain field does not exist in the eastern region. The annual biggest shear strain is different greatly in every grid-cell. The values varies from 4.13×10^{-8} to 7.0×10^{-10} . By and large the annual biggest shear strain in the western region is bigger than that in the eastern region. And so is the variation between any two consecutive annual biggest shear strains in the same grid-cell. The annual surface dilatation show that in most grid-cells of the research region the surface dilatation is in compressibility, and the variation between any two consecutive annual surface dilatation in the same grid-cell is small.

Key words: GPS time series; micro-behavior of strain field; annual strain field