文章编号:1671-8860(2008)08-0854-05　　文献标志码:A

广西区域现今地壳运动构造特性研究

廖超明[1,2]　叶世榕[3]　周晓慧[1]　海　敏[2]

(1　武汉大学测绘学院,武汉市珞喻路 129 号,430079)
(2　广西壮族自治区测绘局国土测绘处,南宁市建政路 5 号 530023)
(3　武汉大学卫星导航定位技术研究中心,武汉市珞喻路 129 号,430079)

摘　要:利用多期 GPS 观测资料计算了广西区域 ITRF2000 框架下的三维速度场、主应变参数及区域参考框架下的三维形变速率和形变运动趋势,研究了该区域现今地壳运动速度场及内部形变规律。结果表明,广西区域随同南华亚板块作 SE-NW 方向的逆时针运动,在 ITRF2000 框架下的东西向速率为 29.3 mm/a,南北向速率为 - 13.4 mm/a,垂向平均速率为 2.3 mm/a;区域内部现今地壳运动的形变量较大(约 4 mm/a),主张应变率(5.48 ×10^{-9}/a)大于主压应变率(3.70 ×10^{-9}/a),地壳应变表现为拉张为主,主应变轴为 N43.19°E。

关键词:GPS 观测站;中国地壳运动观测网络;速度场;应变参数
中图法分类号:P227.1;P228.42

广西区域地质史上地壳活动频繁,先后经历了 7 个活动时期和 19 次构造运动,其中,四堡、广西、东吴、印支和燕山等运动较强烈,为造陆运动或褶皱运动,总的趋势是由活动性向相对稳定性演变。近代,广西地区地壳活动主要表现为缓慢上升[1,2]。区域断裂构造十分发育,北东东和北西向两组断裂是组成区域构造格局的最基本成分,对该区域地质构造的演化和发展起着重要作用。区域地震多为构造地震,受北东东和北西向两组活动性断裂控制,主要分布在桂东南和桂西北地区。1949 年以来,广西区域发生 $M_L \geq 5.0$ 地震共 7 次,$M_L \geq 6.0$ 地震共 2 次。据相关研究,广西目前仍处在第二活跃期的高潮时期[3,4]。本文利用多期 GPS 观测站数据计算了区域地壳运动速度场和应变参数,并对形变和优势运动进行了分析讨论。

1　GPS 数据处理

本文收集和分析了研究区域近 10 a 来观测的多期 GPS 观测站数据,包括 1998～2007 年多期中国地壳运动观测网络 GPS 数据和 2004～2007 年两期广西 A 级 GPS 控制网数据。

利用 GAMIT/GLOBK(Ver 10.32)[5,6] 软件进行 GPS 基线数据处理,联合全球连续运行跟踪站(IGS 站)数据,采用单日松弛法解算 GPS 基线,最终获得 GPS 观测站的测站坐标和轨道是一个在 ITRF 系统上有限漂浮、自恰的、瞬时自由网[7-9]。将单日解 h-file 联合由美国 SIO 计算的全球子网 IGS1、IGS2、IGS3 作为 GLOBK 的输入观测量,利用 IGS 站定义参考框架,将单日松弛解通过七参数相似变换转换到 ITRF2000 框架下,通过子程序 glred 计算 GPS 观测站的时间序列。

2　区域地壳运动三维速度场

通过 GAMIT/GLOBK 计算,得到了各 GPS 观测站基于 ITRF2000 框架下的三维速率及标准差,如表 1 所示。对应具有多期数据的中国地壳运动观测网络 GPS 观测站,其三维速率的估值精度较高,标准差优于 1 mm,与赖锡安等利用 1998～2001 年 GPS 观测站数据计算的中国大陆现今地壳运动速度场的结果相一致[10]。受到地壳垂直位移季节变化的影响,GPS 观测站垂直位移时间序列存在显著的年周期变化[11-14]。当 GPS 观

收稿日期:2008-06-15。
项目来源:国家 863 计划资助项目(2007AA12Z312)。

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

测站观测周期较短,且观测时段不在相同季节时,其垂向速度估值会受到年周期变化的影响。GPS 观测站(IS48、0108、0111、J003)只有两期数据的广西 A 级 GPS 控制网,第一期为 2004 年 359～363 d,第二期为 2007 年 115～117 d,两期观测间隔只有 2.3 a,其东西向、南北向的速率估值标准差优于 1 mm,垂向速率估值标准差优于 2 mm。0108 和 0111 的垂向速率估值与研究区域的垂向整体运动趋势有差异,分析其原因,应与测量标志的沉降有关。IS48、J003 是利用旧测量标石观测,其标志是稳定的;0108、0111 是新埋基本标石,其标志的稳定需要经过一个沉降期。由此分析,可推测 0108、0111 的垂向速率估值 - 6.96 mm/a、- 2.44 mm/a基本反映了新埋标石观测期间的平均沉降速度。对于这种情况,还有待进一步分析。

表 1　广西区域 GPS 观测站的三维速率及精度/ mm ·a^{-1}

Tab.1　3D Velocities and Accuracy of GPS Stations in Guangxi Area/ mm ·a^{-1}

点号	V_e	V_n	V_u	S_e	S_n	S_u	点号	V_e	V_n	V_u	S_e	S_n	S_u
JB26	30.23	- 13.51	0.48	0.23	0.15	0.35	F060	27.87	- 12.67	1.34	0.30	0.16	0.61
F038	32.72	- 13.53	1.12	0.63	0.27	0.97	0108	34.18	- 14.13	- 2.44	0.58	0.37	1.69
JB21	32.11	- 13.38	1.16	0.23	0.12	0.43	F059	30.15	- 13.41	2.71	0.29	0.16	0.60
F049	30.23	- 14.22	2.68	0.35	0.17	0.67	J003	31.66	- 11.90	- 0.25	0.97	0.52	1.89
IS48	25.69	- 13.38	3.49	0.62	0.39	1.59	F062	28.68	- 13.62	2.32	0.26	0.14	0.51
0111	29.80	- 10.69	- 6.96	0.63	0.39	1.82	F078	26.88	- 12.61	2.16	0.31	0.16	0.62
F063	27.42	- 14.01	2.10	0.26	0.14	0.51	F075	30.49	- 12.95	3.03	0.33	0.17	0.63
F065	28.23	- 12.68	3.05	0.28	0.15	0.59	F077	29.18	- 12.64	4.47	0.34	0.16	0.57
F064	29.13	- 13.8	1.22	0.28	0.16	0.58							

注:V_e、V_n、V_u 分别表示观测站 ITRF2000 框架下的东西向、南北向和垂向的三维运动速率;S_e、S_n、S_u 分别表示三个方向的标准差。

ITRF2000 框架下,广西区域现今地壳运动的三维速度场如图 1 所示。由表 1 和图 1(a)的分析可知,ITRF2000 框架下,GPS 观测站水平方向的速率约为 32.5 mm/a,优势运动方向为 NE114°;在青藏高原东北缘 SE 方向的推挤力、南海块体自南向北的推挤力、台湾岛东侧菲律宾海板块向西北方向的仰冲共同作用下,随着华南块体作逆时针旋转[15]。ITRF2000 框架下,GPS 观测站垂向运动的速率在 0～5 mm/a 之间,研究区域垂向运动的整体趋势是缓慢上升的,与区域地质调查结果相一致。其中,上升的优势方位集中在桂西、桂南的北西向断裂带部位。

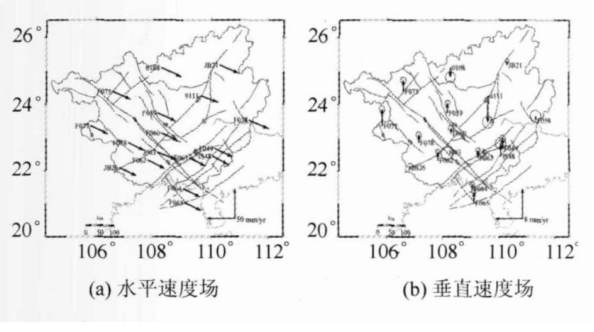


图 1　广西区域 GPS 观测站 ITRF2000 框架下的三维速度场

Fig.1　3D Velocities of GPS Stations in Guangxi Area Relative to ITRF2000

3　区域地壳形变运动与应变分析

3.1　基于区域参考框架下的形变运动分析

为了更好地了解广西区域地壳形变运动的状况,对研究区域 17 个 GPS 观测站的水平速度场进行相对基准变换处理。在此情况下,各观测点已消除了整体运动,所得到的位移矢量是观测点相对于基准点的相对运动,代表了研究区域内部的形变运动。基准点的选择以点位稳定、具有多期观测值、计算精度高为原则,同时确保经相对基准变换后所得到的三维形变图像能够清楚地反映研究区域的地壳形变趋势。经过分析,本文设计以间隔 9 a、具有 5 期观测数据的基本点JB26 作为基准点,通过相对基准变换处理建立了区域参考框架,获取观测站的三维形变速率如表 2 和图 2 所示。

表 2　区域参考框架下 GPS 观测站的三维形变速率/ mm ·a^{-1}

Tab.2　3D Deformation Velocities of GPS Stations in Regional Reference Framework/ mm ·a^{-1}

点号	V_e	V_n	V_u	点号	V_e	V_n	V_u	点号	V_e	V_n	V_u
JB26	0	0	0	F063	- 2.81	- 0.50	1.62	J003	1.43	1.61	- 0.73
F038	2.49	- 0.02	0.64	F065	- 2.00	0.83	2.57	F062	- 1.55	- 0.11	1.84
JB21	1.88	0.13	0.68	F064	- 1.10	- 0.29	0.74	F078	- 3.35	0.90	1.68
F049	0	- 0.71	2.20	F060	- 2.36	0.84	0.86	F075	0.26	0.56	2.55
IS48	- 4.54	0.13	3.01	0108	3.95	- 0.62	- 2.92	F077	- 1.05	0.87	3.99
0111	- 0.43	2.82	- 7.44	F059	- 0.08	0.10	2.23	J003	1.43	1.61	- 0.73

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

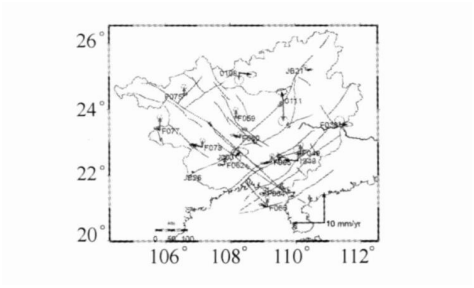


图 2 区域参考框架下 GPS 观测站的三维形变矢量图

Fig. 2 Horizontal Deformation Vectors of GPS Stations in Regional Reference Frame

由表 2 可知,相对基准点 JB26 而言,GPS 观测站的三维形变速率约为 4 mm/a。其中,水平方向形变速率最小的是 F059,为 0.1 mm/a,最大的是 IS48,为 4.5 mm/a;垂直方向形变速率最小的是 0111,为 - 7.40 mm/a,最大的是 F077,为 3.99 mm/a。

从图 2 可以发现,以研究区域中部的北西向断裂为界,在区域参考框架下的 GPS 观测站水平方向出现了显著的分群运动。其中,0108、JB21、F038 可以划分为一组,具有向东的形变运动趋势,0111 则沿着桂林-柳州-南宁-凭祥的北东右旋平移断层向北方向运动。其他 12 个 GPS 观测站除 J003 外,都具有向西、北西西的形变运动趋势,其运动速率自北西向南东由小变大,然后又变小,其最大值出现在北西和北东东两组断裂带的交界处。J003 观测站位于北东向和北西向断裂带的汇集处,形变方向为北东向。其原因是:0111 的观测周期仅有 2.3 a,其形变速度反映的是观测周期的平均速度,与中国地壳运动观测网络观测站近 10 a 的平均形变速度会存在差异。北西向断裂带的垂向形变趋势显著,自北西向南东,垂直形变由大变小,再变大,与水平方向的形变趋势相反。由以上分析可知,河池-玉林-阳江断裂带(见图 3 中的 ①)上盘的垂直速率小于 1 mm/a(JB21、F038 的垂直速率分别为 0.68 mm/a、0.64 mm/a),而下盘的垂向形变平均速率大于 2 mm/a,断裂带上、下盘存在明显的速度差。

3.2 地壳运动应变场分析

为了了解广西区域现今地壳运动应变场的空间分布特征,将研究区域作为一个地块,利用所布设的 17 个 GPS 观测站水平方向的速度场计算各参数[16,17],则最大主张与主压应变率分别为 5.48 $\times 10^{-9}$/a 和 3.70 $\times 10^{-9}$/a,主张应变率大于主压应变率,主张应变轴为 N43.19°E,最大切应变为 9.18 $\times 10^{-9}$/a,最大面应变为 1.78 $\times 10^{-9}$/a,经纬度为(108.619°,22.986°)。由此可知,广西区域现今地壳运动应变以拉张应变为主,同时兼有 N43.19°W 向的挤压,随着应力-应变的积累,必将加激北西向断裂带的构造运动,并以断层位移、地震等方式进行应力能量释放。

4 区域地震活动与构造运动分析

地震活动与地质构造运动有着密切的关系,构造运动活跃的断裂带往往是地震多发地点。本文根据研究区域应变参数和有关资料绘制了广西及周边地区地质构造与地震震中分布图,见图 3。

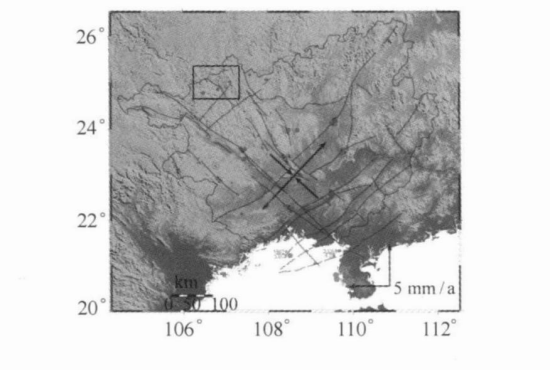


图 3 广西及周边地区地质构造与地震震中分布图(1900～2008 年)

Fig. 3 Geological Tectonic and Epicenter Distribution in Guangxi Province and Adjacent Area(1900-2008)

从图 3 可知,区域断裂构造十分发育,按断层展布方向分为北北东、北东东、北西、南北、北东和东西向 6 组[18,19],其中又以北东东和北西向两组断裂尤为重要,是组成区域构造骨架的最基本成分,对该区域地质构造的演化和发展起着重要作用。

研究区域的地震多为构造地震,受北东东和北西向两组活动性断裂的控制。由表 3 和图 3 可知,1949 年以来,研究区域发生的地震主要集中在河池-玉林-阳江断裂带(见图 3 中的 ①)以西的地区,尤其是集中在防城-灵山、百色-合浦和靖西-崇左断裂带上(见图 3 中的 ②～ ④)和北部湾海域。地震空间分布的北西走向格局表明了本活跃期北西向断裂对研究区域的地震活动有较强的控制作用[4],与本文 GPS 观测站监测到的地壳形变和应变分析结果相一致,同时也兼有水库地震。如图 3 中方框表示的区域,自龙滩水库蓄水以来,大坝 100 km 范围已发生 3 级以下地震 70 多次。特别是 2007 年,该区域先后发生了 3.8 级和 4.6 级地震。

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表 3　广西区域 $M_L \geq 3$ 地震统计表(1949～2008 年)

Tab. 3　Earthquake Statistics of $M_L \geq 3$ in Guangxi Province(1949-2008)

时间	震级	地点	时间	震级	地点	时间	震级	地点
1958.09	5.75	灵山县	1994.12	6.1	北部湾海域	2005.01	4.6	平果县
1960.07	5.01	忻城县	1995.01	6.2	北部湾海域	2006.09	4.2	北部湾海域
1962.04	5.01	田林县	1998.04	4.9	环江县	2007.03	3.8	天峨县
1974.11	4.1	灵山县	2003.03	4.3	扶绥县	2007.07	4.6	天峨县
1977.10	5.02	平果县	2003.05	4.3	钦州市郊区	2007.08	4.1	忻城县
1988.11	5.01	北部湾海域	2003.02	3.0	平果县	2008.03	3.2	南宁市郊区

注:平果县 1925 年 5 月和 1930 年 6 月先后发生了 $M_L = 4.75$ 地震,灵山县 1936 年 4 月发生了广西有记录以来最大的 $M_L = 6.75$ 地震。

分析表 3 可知,研究区域地震活动具有迁移性和重复性[20]。随着时间的推移,震中从一个地区向另一个地区、由一条断裂带向另一条断裂带或同一地震带的一处向另一处转移;同一地点在不同的时间重复发生地震,其中,平果县、灵山县、天峨县、忻城县和北部湾海域是广西地震的多发点。根据地震活动与地质构造运动的内在关系,其特性应与地壳形变积累导致地应力的集中、传递或释放、调整的构造运动有直接关系。

5　结　语

随着地壳形变和地应变的积累,当地震矩的增大突破平衡时,将会以断裂位移或地震的方式释放地应变,从而达到一种新的应力平衡。根据广西区域地震活动的迁移性和重复性特征以及以上应变趋势分析的结果,可能说明了未来几年广西区域的地震活动仍然集中在北西、北东两组断裂带交汇处,且重点在桂南的北部湾地区。

参　考　文　献

[1] 莫敬业. 广西通志 ·地震志[M]. 南宁:广西人民出版社, 1990:32-80

[2] 广西壮族自治区区调队. 广西北海 1 ∶20 万区域水文地质调查报告[M]. 南宁: 广西壮族自治区地矿局,1973

[3] 杨仕升.广西地震活动与我国主要地震区(带)地震活动的相关分析[J].西北地震学报,1998(2):36-42

[4] 郭培兰.广西及邻区地震活动特征[J].地震地磁观测与研究,2005(1):8-12

[5] King R W, Bock Y. Documentation for the GAMIT Analysis Software[C]. Mass Inst Technol, Cambridge, 2003

[6] Herring T A. GLOBK: Global Kalman Filter VLBI and GPS Analysis Program[M]. Ver 5.0. Massachusette: Massachusetts Institute of Technology, 1999

[7] Arnadottir T, Jiang Weiping, Feigl K, et al. Kinematic Models of Plate Boundary Deformation in Southwest Iceland Derived from GPS Observations [J]. Journal of Geophysical Research, 2006, 111 (B7):402

[8] 许才军. 青藏高原地壳运动模型与构造应力场[M]. 北京:测绘出版社,2002

[9] 周晓慧. 利用多期 GPS 数据研究青藏高原地壳运动[D]. 武汉:武汉大学,2006

[10] 赖锡安,黄立人,徐菊生. 中国大陆现今地壳运动[M]. 北京:地震出版社,2004

[11] Wdowinski S, Bock Y, Zhang Jie, et al. Southern California Permanent GPS Geodetic Array: Spatial Filtering of Daily Positions for Estimating Coseismic and Postseismic Displacements Induced by the 1992 Landers Earthquake[J]. Journal of Geophysical Research, 1997,102(B8):18 057-18 070

[12] 张诗玉. 我国 GPS 基准站垂直位移季节变化的研究[D]. 武汉:中国科学院测量与地球物理研究所, 2004

[13] 顾国华. 基准站 GPS 连续观测得到的垂直位移时间序列[J]. 地震地质,2005(6):333-340

[14] 王敏,沈正康,董大南.非构造形变对 GPS 连续站位置时间序列的影响和修正[J].地球物理学报,2005, 48(5):1 045-1 052

[15] 张静华,李延兴,郭良迁,等. 华南块体的现今构造运动与内部形变[J]. 大地测量与地球动力学,2005 (8):57-62

[16] Drew A R, Snay R A. DYNAP: Software for Estimating Crustal Deformation for Geodetic Data[J]. Tectonophysics, 1989, 162: 331-343

[17] Feigl K L, King R W, Jordan T H. Geodetic Measurement of Tectonic Deformation in the Santa Maria Fold and Thrust Belt, Califoria[J]. Journal of Geophysical Research, 1990, 95: 2 679-2 699

[18] 广西壮族自治区地图集编纂委员会. 广西壮族自治区地图集[M]. 北京: 星球地图出版社,2003

[19] 广西壮族自治区区调队. 北海市区域综合地质调查报告[M]. 南宁: 广西壮族自治区地地矿产局, 1990

[20] 游象照. 广西地震活动与地震特征[J]. 广西地质, 1988(1):63-73

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

第一作者简介:廖超明,博士生。主要从事 GPS 数据处理方法与 GPS 技术应用研究。
E-mail:gps94041 @163.com

Present-day Tectonic Characteristics of Crustal Movement in Guangxi Area

LIAO Chaoming[1,2] *YE Shirong*[3] *ZHOU Xiaohui*[1] *HAI Min*[2]
(1 School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan 430079, China)
(2 Department of Land Surveying, Guangxi Bureau of Surveying and Mapping, 5 Jianzheng Road, Nanning 530023, China)
(3 Research Center of GNSS, Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan 430079, China)

Abstract: In order to monitor present-day crustal motion and internal deformation rule in Guangxi area, repeated GPS campaigns (1998, 1999, 2003, 2004 and 2007) are used to calculate the 3D velocity field relative to ITRF2000, principal strain parameters and the 3D deformation velocities and deformation trends in a regional reference frame. The results show that Guangxi area along south China plate moves anticlockwise in SE-NW direction at the rate of 2.3 mm/a, and the average velocity in east-west direction is 29.3 mm/a, and the average velocity in south-north direction is - 13.4 mm/a and the average vertical velocity is 2.3 mm/a. The present-day crustal movement in regional reference frame is relative large (about 4 mm/a), and the principal tensile strain rate ($5.48\ 10^{-9}$/a) is larger than the compressive strain rate (3.70×10^{-9}/a), Guangxi area is mainly under the extension strain in the direction of N43.19°E.

Key words: GPS stations; crustal movement observation network of China; velocity field; strain rate parameters

About the first author: LIAO Chaoming, Ph.D candidate, majors in GPS data processing and GPS application.
E-mail: gps94041 @163.com

(上接第 853 页)

Study on Urban Area Subsidence Monitoring Based on InSAR Technique

ZHANG Shiyu[1] *LI Tao*[1] *XIA Ye*[2]
(1 Research Center of GNSS, Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan, 430079, China)
(2 GeoForschungsZentrum Potsdam, Germany)

Abstract: Based on open source software platform DORIS and self-developed software modules for baseline errors correction and atmospheric delay effects mitigation, ENVISAT SAR data (2003-2007) of Langfang and Shengfang town area are processed. 12 GPS stations' data are used to mitigate the atmospheric delay effects in interferograms. SRTM3 DEM is introduced to estimate the residuals of flatten earth effects. The center locations of the subsidence cones are calculated and the annual subsidence rates in these areas are precisely acquired.

Key words: atmospheric delay effects; baseline error; GPS; SRTM; subsidence

About the first author: ZHANG Shiyu, Ph.D candidate, majors in crustal deformation and InSAR data processing.
E-mail: sheperdshiyu @163.com

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net