



动态

中国大陆构造变形高精度大密度 GPS 监测—现今速度场

李强^①, 游新兆^①, 杨少敏^②, 杜瑞林^②, 乔学军^②, 邹蓉^③, 王琪^{③*}

① 地壳运动监测工程研究中心, 北京 100036;

② 中国地震局地震研究所, 武汉 430071;

③ 中国地质大学行星科学研究所, 武汉 430074

* 联系人, E-mail: wangqi@cug.edu.cn

收稿日期: 2012-02-03; 接受日期: 2012-03-05

国家重大科技基础设施项目“中国大陆构造环境监测网络”和国家自然科学基金(批准号: 40674054, 41074016)资助

中国大陆地壳运动持久、强烈、广为发育, 是我国高山巍峨、大河东流的缘由, 也是地震频繁、震害沉重的起因. 获取复杂的地壳变形信息是研究陆地变迁、环境演化必要条件, 而监测现今地壳运动状态更是地震研究、减轻灾害的重要基础.

20 世纪 80 年代末, 我国开始用 GPS 监测地壳形变^[1], 之后的十多年里, 我国有关单位陆续在川滇、河西走廊、青藏高原、新疆天山、华北、福建东南沿海等地区开展区域性流动观测, 建设变形观测站约 300 余个^[2~4]. 1998~2001 年间实施重大科学工程“中国地壳运动观测网络”(简称网络工程), 建成 27 个连续观测基准站和 1056 个定期观测区域站, 比较完整给出我国地壳变形图像^[5,6], 但部分地区测站仍比较稀疏, 图像分辨率不高.

2008~2011 期间在“网络工程”基础上, 实施“中国大陆构造环境监测网络”(简称陆态网络), 新建 233 个连续观测基准站和 1000 个定期观测区域站, 测站密度大幅提高, 并具备一定的动态监测能力. 本文利用“网络工程”多年资料和“陆态网络”新资料, 尝试构建更高分辨率地壳变动图.

新变形图像主要以“网络工程”1056 个区域站 1998~2007 年观测及“陆态网络”共计 2056 个区域站 2009 和 2011 年两期观测资料为基础. 每期区域站整

网观测均安排在当年 3~8 月, 每站用双频 GPS 接收机和高精度测地型天线持续观测至少 4 整天, 2009 年前仅有 27 基准站配合观测, 统一配备扼流圈天线. 2011 年 233 个新建基准站陆续投入运行, 并网联测.

2007 年前“网络工程”区域站数据用 GIPSY 软件处理, 2009 年后“陆态网络”区域站数据采用四种独立软件, 尽可能增强 1000 个新站观测结果的可靠性. 处理算法主要分单站精密定位(GIPSY 和 PANDA)和多站双差分定位(GAMIT 和 BERNES)两类. 所有软件均以 24 小时观测(UTC 0:00~24:00) 为一个独立单元, 利用事后精密星历解算测站当日坐标值(单日时段解). 单日时段解统一转换到全球参考框架 ITRF2005(International Terrestrial Reference Frame)^[7], 其中 2009 年后 4 个软件独立处理的结果在转换时等权合并成一个单日时段解. 最后假定测站线性移动, 用最小二乘平差估算测站在全球参考框架下位移速.

通过平差计算, 检测到 104 个测站位移异常, 其中大约 59 个可能是站址、观测或仪器等因素所致, 另有 45 个测站受国内大地震影响, 本文暂且剔除这些异常测站, 等待后续观测修正. 其实, 近期大地震对陆态网络的影响不限于以上 45 个测站, 例如, 2011 年日本宫城 M_w 9.0 地震造成我国东北、华北最大 35 mm 地壳东移^[8], 数百个测站受到不同程度的影响.

为此, 本文基于以上地区基准站 3 月 11 日前后各 3 天坐标平均值之差, 采用双三次样条内插算法估算东北、华北区域站同震位移, 估算精度不低于 3 mm, 这些测站同震扰动在随后平差计算中加以改正.

由于地震时缺少足够基准站资料, 本文采用其他方式处理 2001 年昆仑山、2004 年苏门答腊、2008 年汶川和 2010 年玉树地震^[9-12]的同震扰动. 对于地震近场测站, 仅用震前资料计算测站位移速度, 避免震后变形影响, 少量震前无观测, 或只有一期观测数据的测站均被舍弃; 对于远场测站(同震位移不超过 20 mm), 分别拟合震前、震后测站坐标序列估算同震位移, 估算精度不低于 4~5 mm.

最后参与平差计算的测站总计 1979 个, 其水平位移当扣除欧亚板块大体朝东偏南方向整体旋转

后^[7], 剩余位移幅度大致在 0~40 mm/a, 代表了区域站相对欧亚大陆的变形(图 1; 作为补充, 图中还显示最近发表的中国周边地区 GPS 观测结果^[13-17]), 除少量站点外, 绝大多数测定精度优于 2 mm/a. 与前期反映中国大陆地壳变形的系列图像比^[4-6], 其最大特点是空间分辨率高, 构造变形特征更为丰富、翔实.

中国大陆活动构造主要受印度板块向北推挤作用控制, 构造变形如同我国的地形、地貌大致以 105°~106°E 为界, 分成面积相当、特征迥异的东、西两大区域. 东部地区变形样式比较简单, 地壳大致向东南, 或东偏南方向整体运移, 由北到南运移逐步递增, 从东北地区的 2~7 mm/a, 到华北地区 4~9 mm/a, 再到华南地区的 6~11 mm/a, 区域间整体运动不超过 2 mm/a, 但分区界限并不清晰. 而遍布东北、华南地

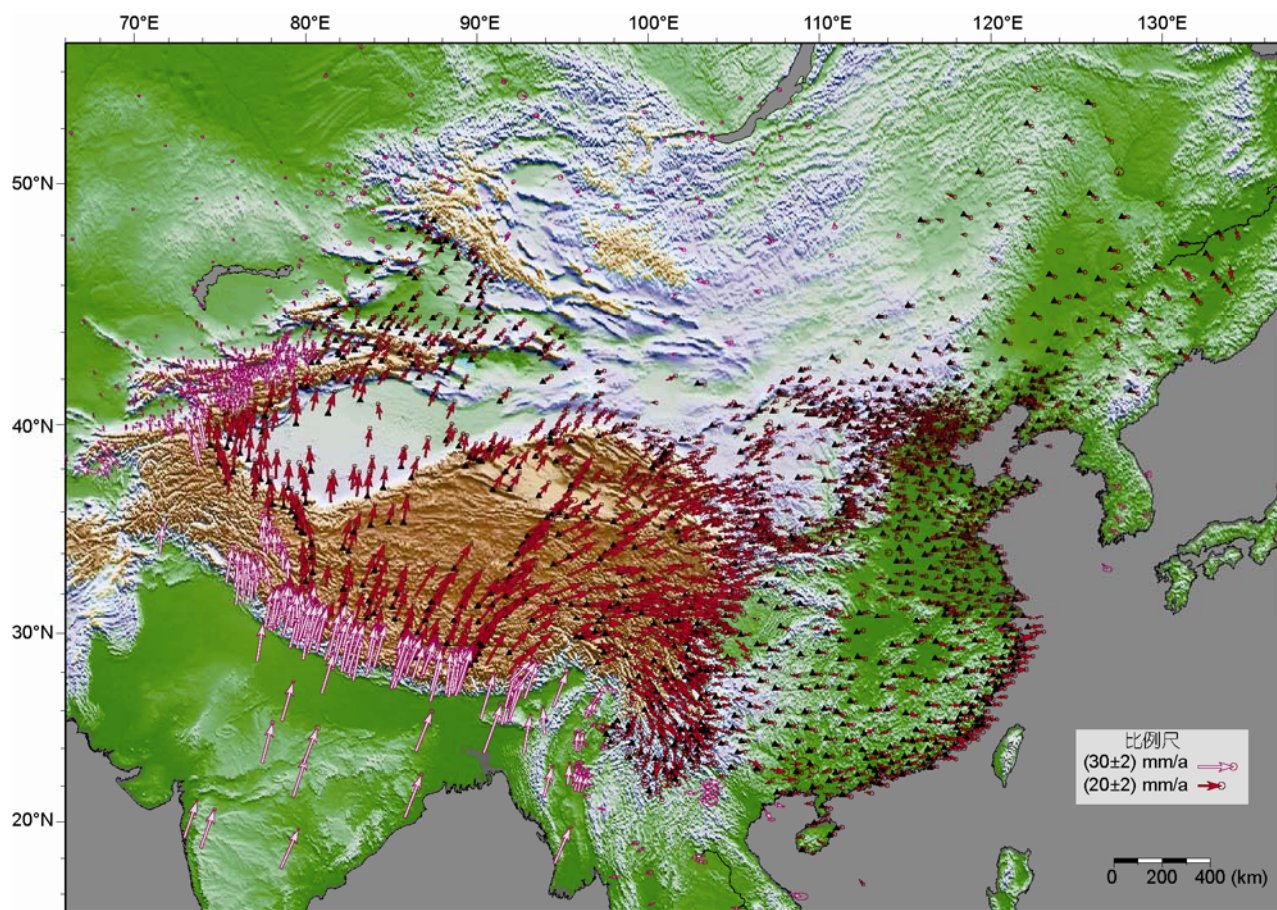


图 1 中国大陆及其邻区地壳现今速度场

深红色箭头以年平均速率方式展示 1979 个测站水平位移(误差椭圆代表 67%置信度), 新测站用黑色三角形表示, 788 个粉红色箭头代表境外测站位移, 来自文献^[13-17]

区资料没有显示出明显的位移梯度带,即这两个地区内部没有重要的差异运动^[4,5].华北地区密集的GPS资料可能检测到鄂尔多斯周缘多条断陷盆地微弱变形,以及张家口-渤海构造带低速率剪切走滑—跨这些活动带的GPS差异速率都不过1~3 mm/a^[18].

西部地区构造变动突出表现为青藏高原大幅度隆升,高原内部与周缘变形复杂,发育大规模挤压、拉张和剪切走滑活动构造^[19].在印度板块向北推挤下,欧亚板块的变形响应远及天山、阿勒泰、外蒙古和贝加尔一带^[13~15].GPS观测显示青藏高原的变形特点可概略为三方面^[20~22]: (1) 连续分布挤压,测站位移沿板块汇聚方向由南向北逐步递减; (2) 近东西向伸展,测站速度矢量由藏南的北东向转向藏北的正东向; (3) 绕东喜马拉雅构造结顺时针旋转,藏东南测站速度矢量由北东转向南西,总体旋转近180°.

高原内部新增测站资料进一步显示青藏高原不同构造部位变形模式的差异性.例如沿青藏公路走向(N20°E)的GPS测站基本向东北方向移动,位移近似线性递减,从喜马拉雅山前到祁连山北缘的挤压变形吸收印度-欧亚板块36~38 mm/a汇聚的80%~85%;而大致沿80°E走向GPS测站向北偏西方向移

动,在这条剖线上,青藏高原显示非均匀挤压应变,其中跨喜马拉雅及青藏高原南缘的挤压变形就达到16 mm/a.

塔里木、准葛尔盆地内新增GPS数据显示其基本不变形,而是整体顺时针旋转,向北偏东或北东方向运移.再两大盆地挟持下,天山西(80°E以西)16~18 mm/a的缩短吸收印度-欧亚板块几乎一半的汇聚变形^[14],以致天山以北哈萨克地区几乎不变形^[15].东天山(88°E以东)缩短仅为2~6 mm/a,天山北缘向东北运移仍高达7~9 mm/a.阿勒泰山和戈壁阿勒泰的变形吸纳其中4~6 mm/a运动量,剩余部分通过蒙古及以北地区的东向运移来调节.

高精度、大密度测定不同区域构造变形的一个重要目的是建立统一、精确的运动学模型,并为中长期地震危险性分析提供定量依据.大陆活动构造的刚性块体旋转或连续介质变形是两个争议最大的端元模型^[23],尽管二十年来中国大陆及周边地区各类资料不断完善,但此前GPS研究表明^[20,24,25],以当时的观测精度和测站密度,不能判定两种模式的优劣,或一种混合模型更好.“陆态网络”持续观测有望进一步提高区域站测定精度,将为大陆构造变形的运动学及其动力学研究提供更为全面、准确的观测约束.

致谢 感谢参与网络工程和陆态网络建设、观测和运行维护的全体工作人员.中国地震局地震研究所GNSS分析中心提供了GIPSY, Bernese和GAMIT软件处理成果,武汉大学卫星导航定位研究中心提供PANDA软件处理成果,一并致谢.

参考文献

- 1 Lai X, Wu X, Seeber G, et al. The first epoch western Yunnan GPS survey: Data reduction and analysis with Geonap software. *Earthq Res China*, 1992, 6: 68–90
- 2 Chen Z, Burchfiel B, Liu Y, et al. Global Positioning System measurements from eastern Tibet and their implications for India/Eurasia intercontinental deformation. *J Geophys Res*, 2000, 105: 16215–16227
- 3 Shen Z K, Wang M, Li Y, et al. Crustal deformation along the Altyn Tagh fault system, western China, from GPS. *J Geophys Res*, 2001, 106: 30607–30622
- 4 Wang Q, Zhang P Z, Freymueller J, et al. Present-day crustal deformation in China constrained by Global Positioning System measurements. *Science*, 2001, 294: 574–577
- 5 王敏, 沈正康, 牛之俊, 等. 现今中国大陆地壳运动与活动块体模型. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2003, 33 (增刊): 21–32
- 6 牛之俊, 王敏, 孙汉荣, 等. 中国大陆现今地壳运动速度场的最新观测结果. *科学通报*, 2005, 50: 839–840
- 7 Altamimi Z, Collilieux X, Legrand J. ITRF2005: A new release of the International Terrestrial Reference Frame based on time series of stations and Earth Orientation Parameters. *J Geophys Res*, 2007, 112: B09401, doi: 10.1029/2007JB004949
- 8 王敏, 李强, 王凡, 等. 全球定位系统测定的2011年日本宫城 M_w 9.0级地震远场同震位移. *科学通报*, 2011, 56: 1593–1596
- 9 Lasserre C, Peltzer F, Crampé F, et al. Coseismic deformation of the 2001 M_w 7.8 Kokoxili earthquake in Tibet, measured by synthetic aperture radar interferometry. *J Geophys Res*, 2005, 110(B12), doi: 10.1029/2004JB003500

- 10 Qiao X, Yang S, Du R, et al. GPS-derived crustal deformation in southwestern China. *Austrian J Earth Sci*, 2006, 54: 521–529
- 11 国家重大科学工程“中国地壳运动观测网络”项目组. GPS 测定的 2008 年汶川 M_s 8.0 级地震的同震位移场. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2008, 38: 1195–1206
- 12 Zha X, Dai Z, Ge L, et al. Fault geometry and slip distribution of the 2010 Yushu earthquakes inferred from InSAR measurement. *Bull Seismo Soc Am*, 2011, 101: 1951–1958
- 13 Calais E, Vergnolle M, Sankov V, et al. GPS measurements of crustal deformation in the Baikal-Mongolia area (1994–2002): Implications for current kinematics of Asia. *J Geophys Res*, 2003, 108(B10): 2501, doi: 10.1029/2002JB002373
- 14 杨少敏, 李杰, 王琪. GPS 研究天山现今变形与断层活动. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2008, 38: 872–880
- 15 Zubovich A, Wang X, Scherba Y, et al. GPS velocity field for the Tien Shan and surrounding regions. *Tectonics*, 2010, 29: TC6014, doi: 10.1029/2010TC002772
- 16 Banerjee P, Bürgmann R, Nagarajan B, et al. Intraplate deformation of the Indian subcontinent. *Geophys Res Lett*, 2008, 35: L18301, doi: 10.1029/2008GL035468
- 17 Maurin T, Masson F, Rangin C, et al. First global positioning system results in northern Myanmar: Constant and localized slip rate along the Sagaing fault. *Geology*, 2010, 38: 591–594
- 18 Jin S, Park P, Zhu W. Micro-plate tectonics and kinematics in Northeast Asia inferred from a dense set of GPS observations. *Earth Planet Sci Lett*, 2007, 257: 486–496
- 19 Tapponnier P, Xu Z, Roger F, et al. Oblique stepwise rise and growth of the Tibet Plateau. *Science*, 2001, 294: 1671–1677
- 20 Chen Q, Freymueller J, Wang Q, et al. A deforming block model for the present-day tectonics of Tibet. *J Geophys Res*, 2004, 109: B01403, doi: 10.1029/2002JB002151
- 21 Zhang P Z, Shen Z K, Wang M, et al. Continuous deformation of the Tibetan Plateau from GPS data. *Geology*, 2004, 32: 809–812
- 22 Gan W, Zhang P, Shen Z K, et al. Present-day crustal motion within the Tibetan Plateau inferred from GPS measurements. *J Geophys Res*, 2007, 112: B08416, doi: 10.1029/2005JB004120
- 23 Thatcher W. Microplate versus continuum descriptions of active tectonic deformation. *J Geophys Res*, 1995, 100: 3885–3894
- 24 England P, Molnar P. The field of crustal velocity in Asia calculated from Quaternary rates of slip on faults. *Geophys J Int*, 1997, 130: 551–582
- 25 Meade B. Present-day kinematics at the India-Asia collision zone. *Geology*, 2007, 35: 81–84