

王武星, 石耀霖, 顾国华等. GRACE 卫星观测到的与汶川 $M_s 8.0$ 地震有关的重力变化. 地球物理学报, 2010, 53(8): 1767~1777, DOI: 10.3969/j.issn.0001-5733.2010.08.002

Wang W X, Shi Y L, Gu G H, et al. Gravity changes associated with the $M_s 8.0$ Wenchuan earthquake detected by GRACE. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2010, 53(8): 1767~1777, DOI: 10.3969/j.issn.0001-5733.2010.08.002

GRACE 卫星观测到的与汶川 $M_s 8.0$ 地震有关的重力变化

王武星^{1,2}, 石耀霖², 顾国华¹, 张 晶¹, 陈 石³

1 中国地震局地震预测研究所, 北京 100036

2 中国科学院研究生院计算地球动力学实验室, 北京 100049

3 中国地震局地球物理研究所, 北京 100081

摘 要 利用 GRACE 卫星重力资料, 计算了中国大陆及周边的卫星重力时变场和地表密度变化分布, 获取了具有代表性的点位区域的每月重力变化时间序列. 同时获得了 WUSH、LHAS、KUNM、LUZH 站相对于区域参考框架的 GPS 位移时间序列. 卫星重力观测结果显示喜马拉雅弧形带的重力在 2004 年苏门答腊 $M_w 9.3$ 地震后快速下降, 2006~2008 年尤为明显, 西域地块西北边界带上震后重力下降也较为显著; 而沿青藏高原北至东边界 2007 年出现明显的重力上升沿构造边界的弧形分布, 且 2008 年南北地震带中南段重力上升变化显著. 这些苏门答腊地震后的重力变化趋势到汶川地震发生后才开始改变. GPS 位移结果显示四个台站均记录到苏门答腊大地震的同震信号, 震后 WUSH、LHAS、KUNM 站水平位移向量出现明显的运动趋势改变, 且一直持续到 2008 年汶川 $M_s 8.0$ 地震的发生. GRACE 卫星揭示的青藏高原及周边地表质量的变化为解释汶川地震的动力机制提供了新的观测途径和资料. 本文结合区域构造运动的特点和 GPS 位移, 对 GRACE 观测的时变重力场特征及汶川地震的动力机制进行了初步解释和讨论.

关键词 汶川地震, 苏门答腊地震, GRACE 卫星, 重力变化, GPS, 位移

DOI: 10.3969/j.issn.0001-5733.2010.08.002

中图分类号 P228, P315

收稿日期 2010-01-05, 2010-07-01 收修定稿

Gravity changes associated with the $M_s 8.0$ Wenchuan earthquake detected by GRACE

WANG Wu-Xing^{1,2}, SHI Yao-Lin², GU Guo-Hua¹, ZHANG Jing¹, CHEN Shi³

1 *Institute of Earthquake Science, China Earthquake Administration, Beijing 100036, China*

2 *Laboratory of Computational Geodynamics, Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*

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

Abstract Time variable changes in gravity field on and around Chinese Mainland before and after the Wenchuan $M_s 8.0$ earthquake are obtained from the GRACE satellite gravity data. Time series of gravity changes at typical locations are also obtained. At the same time, time series of displacements at GPS fiducial stations of WUSH, LHAS, KUNM and LUZH are obtained in the regional reference frame. Results from GRACE indicate that after the Sumatra earthquake along the Himalaya arc the satellite gravity showed rapid decrease, particularly during the period of 2006 to 2008 the decrease in gravity was significant; while along the northwestern boundary of

the Xiyu block there was also significant post seismic decrease in gravity. And along the northern and eastern boundaries of the Tibetan plateau there appeared an arc along the tectonic boundary with significant gravity increase in 2007. But in 2008 there was also significant increase in gravity in the southern and middle segments of the North-South seismic belt. This trend in gravity variations after the Sumatra earthquake changed only after the Wenchuan earthquake. Displacements at 4 GPS stations recorded coseismic signals of the great Sumatra earthquake, and then the horizontal displacement vectors at WUSH, LHAS and KUNM showed significant changes in their general trend until the occurrence of the Wenchuan $M_s 8.0$ earthquake. The changes in the density of the ground mass in the Tibetan plateau and the surrounding areas as revealed by the GRACE satellites have provided new observation approach and data for the explanation of the dynamic mechanism of the Wenchuan earthquake. A preliminary explanation and discussion on the characteristics of the time variable changes in the gravity field observed by GRACE and the dynamic mechanism of the Wenchuan earthquake are presented in this paper by combining the features of regional tectonic movements and displacements of GPS observations.

Keywords Wenchuan earthquake, Sumatra earthquake, GRACE satellites, Change in gravity, GPS, Displacement

1 引言

2002年3月发射的GRACE(Gravity Recovery and Climate Experiment)卫星,其目的是提供地球重力场及其时间变化的精细测量,为人们对于地球内部构造的理解并为海洋和气象研究提供更好的参考.该卫星观测到的重力场变化主要是由地球流体圈层的质量迁移引起,也可能由与冰川均衡调整和地震等现象有关的质量运移造成.GRACE为大地测量学、海洋学、冰河学、水文学和固体地球科学的研究带来新的观测途径.2004年苏门答腊 $M_w 9.3$ 大地震以来,很多学者利用GRACE观测的地球重力场来研究大地震的同震及震后变形.Han等^[1]给出了世界上第一个由重力卫星观测到的同震重力变化结果.这个结果是利用GRACE level-1B数据集对2004年苏门答腊 $M_w 9.3$ 级地震引起的重力变化解算获得的.紧随其后有很多研究者利用不同版本的GRACE卫星数据获得了苏门答腊地震的同震及震后变形,并初步进行了解释.Ogawa和Heki^[2]利用GRACE level-2(Release-1)数据展示了由苏门答腊 $M_w 9.3$ 级地震形成的大地水准面下沉的震后缓慢恢复;并认为这是上地幔超临界的水扩散的结果.Chen等^[3]利用新发布的GRACE level-2(Release-4)数据集,采用去相关和高斯滤波结合的滤波方法,以等效水厚度变化的形式获取了苏门答腊地震的同震和震后质量变化.Panet等^[4]利用球体上的连续

小波分析方法分析了GRACE卫星数据,研究了苏门答腊2004年 $M_w 9.3$ 和2005年 $M_w 8.7$ 级地震引起的大地水准面变化,发现震后松弛有两个时间尺度,讨论认为同震变化由地壳、上地幔岩石密度变化和垂直位移引起;震后变化与地幔的黏弹性响应和热的存在有关.

2004年12月26日苏门答腊 $M_w 9.3$ 地震后,在该区域又相继发生了2005年3月29日的 $M_w 8.7$ 、2007年9月12日的 $M_w 7.9$ 和 $M_w 8.4$ 等多次大余震.此外,青藏地块边界上先后发生2005年10月8日巴基斯坦 $M_s 7.8$ 级地震,2008年3月21日新疆于田 $M_s 7.3$ 级地震和2008年5月12日汶川 $M_s 8.0$ 级地震(31.0°N , 103.4°E).这三次地震分别发生在印度板块向欧亚板块俯冲的青藏地块西南边界,与西域地块交界的西北边界和东边界龙门山断裂带(图1).

地表重力观测表明,汶川 $M_s 8.0$ 地震前后震源区的地表重力变化非常明显,1998~2007年累积重力变化幅差最大约 $200 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$,震中西南至南北地震带中南段持续多年为正重力变化、东北侧为重力下降,并出现较大规模的重力高梯度带,涉及区域长约620 km,宽约150~260 km^[5~8].很多学者也尝试利用GRACE卫星观测获取汶川地震同震及震后重力变化.但用位错理论获得的同震空间固定点观测的重力变化表明^[9]:经300 km高斯滤波平滑后,产生的变化仅为 $(0.12 \sim 0.24) \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$.可见,由于信号的减弱,GRACE卫星观

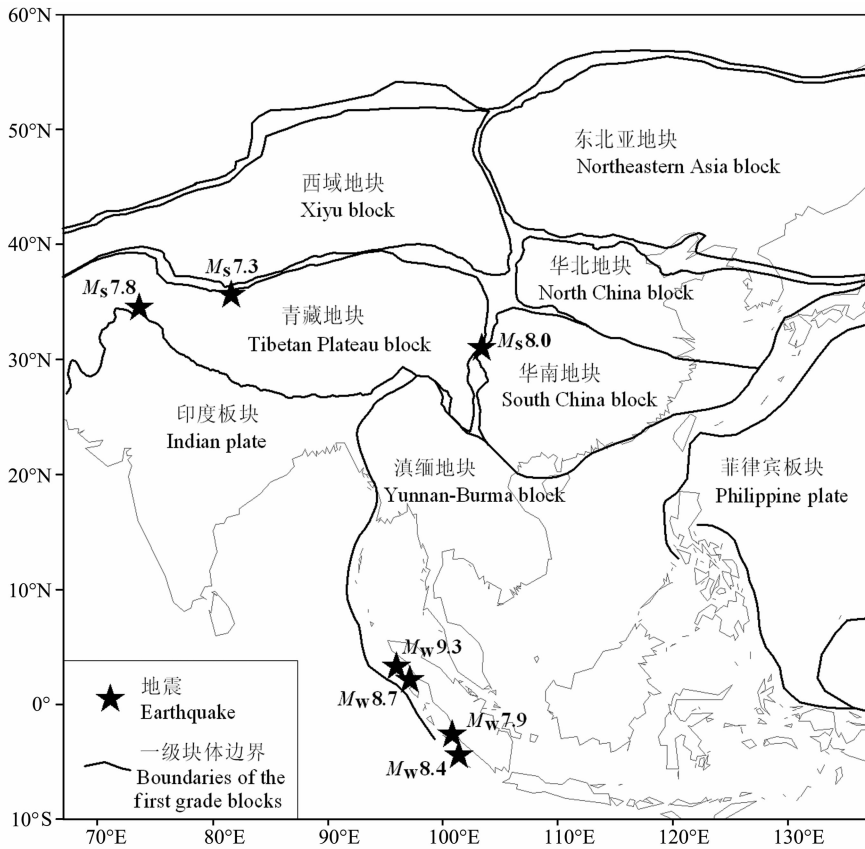


图 1 几次大地震所处构造位置分布(一级块体分界线数据引自张培震等^[16])

Fig. 1 Distribution of the large earthquakes and tectonic structures

(The boundaries of the first grade blocks are based on the result of Zhang et al. ^[16])

测的仅仅是低频重力变化,以目前的观测和数据处理技术尚难以在震源区探测到该地震的同震变形。

从大尺度构造动力环境来看,印度板块与欧亚板块的挤压碰撞或汇聚,形成了青藏高原;随着高原不断向北推进与挤压,造成高原不断隆升,地壳加厚与南北缩短;同时在挤压力与重力作用下,高原物质向四周运移,但受围限高原的较强刚性块体阻挡,导致了高原物质侧向流出现象和大型走滑剪切带的形成^[10~14]。其中,高原物质东流过程中,受到华北鄂尔多斯和华南地块四川盆地等高强度块体的阻挡,在青藏高原东缘形成了局部挤压推覆构造带及其前陆盆地系统,其中包括青藏高原东部巴颜喀拉与华南两地块分界的龙门山推覆构造带^[10]。这种大尺度的构造动力的结果也从由 GPS 获得的中国大陆地壳运动特点显现出来^[15]。故此,从大空间尺度上探索和汶川地震有关的重力场变化就有其必要性和可行性。

利用大时空尺度的 GRACE 卫星重力时变场,结合部分 GPS 连续站观测的位移时间序列,探索与 2008 年汶川地震有关的地壳运动和重力变化,讨论苏门答腊地震对中国大陆构造活动的影响,是本文

研究的出发点。

2 GRACE 数据处理

自 2002 年 3 月以来,GRACE 卫星已经积累了多年的观测资料。美国德克萨斯大学空间研究中心(Center for Space Research, University of Texas at Austin, CSR)、美国喷气动力实验室(Jet Propulsion Laboratory, JPL)和德国地学中心(Geo Forschungs Zentrum, GFZ)每月对外公布全球重力位的球谐函数展开式表达的卫星观测的全球重力场模型。地球重力位的球谐函数展开式是研究地球重力场各种量的基础^[17~19]。其表达式为

$$U(r, \phi, \lambda) = \frac{GM_e}{r} \left[1 + \sum_{l=2}^{\infty} \sum_{m=0}^l \left(\frac{R_e}{r} \right)^l (C_{lm} \cos m\lambda + S_{lm} \sin m\lambda) P_{lm}(\sin\phi) \right], \quad (1)$$

其中 r, ϕ, λ 分别为地心距离、纬度、经度; GM_e 为重力常数与地球质量乘积; R_e 为赤道半径; C_{lm}, S_{lm} 为 l 阶 m 次的球谐系数; $P_{lm}(\sin\phi)$ 为 l 阶 m 次的完全

正则化勒让德函数.

由重力位函数的导数可确定全球一定密度网格的每月地球重力场,在此基础上分析地球重力场的时间变化.通常用地球表面密度变化来表示地球表层质量重新分布与重力场变化的关系,其表达式为^[17,20]

$$\Delta\sigma(\theta, \lambda) = \frac{2R_e \rho_{ave} \pi}{3} \sum_{l=0}^{\infty} \sum_{m=0}^l \frac{2l+1}{1+k_l} W_l \tilde{P}_{lm}(\cos\theta) \times [\Delta C_{lm} \cos(m\lambda) + \Delta S_{lm} \sin(m\lambda)], \quad (2)$$

式中: ρ_{ave} 为地球平均密度, θ 为余纬度, k_l 为阶数为 l 的 Love 数, \tilde{P}_{lm} 为完全正则化连带勒让德函数, $W_l = W_l(r)$ 是高斯平滑函数,为滤波半径 r 的函数.其他参数与公式(1)相同.

本文使用的是 CSR 发布的 GRACE level-2 (Release-4)数据解,为 60 阶次的正则化月球谐系数.该版本与之前的版本比较,主要的改进在于:使用了新的背景重力模型 GIF22a,新的日、半日周期的海洋潮汐模型 FES2004^[21],以及更新后的基于 IERS2003^[22]的固体地球极潮模型;并用基于卫星测高数据的自洽均衡模型 SCEQ^[23]来模拟海洋极潮的影响.详细的 Release-04 数据处理标准见 Bettadpur^[24,25].大气和海洋的混淆产物没有被加回 GRACE 重力场,因此它们的影响大都被从 GRACE 重力场中去除.

地球重力位的精度与球谐系数(C_{lm} ; S_{lm})的精度和空间分辨率有关, l 、 m 分别为球谐系数的阶和次;而空间分辨率与最大阶数 l_{max} 有关, l_{max} 越大分辨率越高.目前高阶项的系数(C_{lm} ; S_{lm})通常噪声水平较高,重力场模型中的高频噪声信号很多,主要有与卫星轨道有关的条纹信号.因此,为抑制噪声,得到期望的信息,卫星重力场数据的平滑滤波尤为重要.大量的研究表明,高斯滤波是分析卫星重力数据简单而实用的方法^[17,26,27],近年来也有不少改进的滤波方法,Fan 滤波器^[28]就是其中之一.本研究的目标是探索利用 GRACE 卫星观测的大空间尺度时变重力场结合部分 GPS 连续观测时间序列讨论与大地震有关的板块构造运动及变形效应,采用了 500 km 的高斯滤波和 300 km 的 Fan 滤波器.

3 GRACE 观测到的与汶川地震有关的重力变化

GRACE 能清楚地记录到苏门答腊 M_w 9.3 地震的同震及震后变形效应,而它是否也能记录到汶

川 M_s 8.0 地震引起的效应引人关注.利用 2008 年 6 月至 2009 年 4 月与 2007 年 6 月至 2008 年 4 月的平均重力场的差分,经高斯滤波后获得汶川 M_s 8.0 地震震源区域的重力变化;从该结果中没有看到汶川地震引起的同震变形效应.那么,苏门答腊 M_w 9.3 地震前后,中国大陆及其周边的重力场演化有什么样的特征?为了观测其同震及震后重力场演化,选取 2003 年 1 月至 12 月的平均重力场作为比较的基准,将 2004~2008 年各年的月平均重力场与其进行差分获得相对它的变化(计算 2004 年平均重力场时不采用苏门答腊地震发生的 12 月份的数据).这样可以有效地压制降水等周期性季节变化引起的重力变化信号.通过 500 km 高斯滤波获得中国大陆及周边的卫星时变重力场(图 2).图 2 最显著的特征是青藏地块南边界,即印度板块向欧亚板块俯冲的喜马拉雅带上重力下降变化非常明显,尤其是 2006~2008 年下降最大幅度约为 $6 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$.图中西域地块西北边界天山山脉一带 2007~2008 年重力下降也较为显著,下降最大幅度约为 $4 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$.滇缅地块及周边的重力变化反映的是苏门答腊地震的同震及震后重力变化.重力上升比较明显的有印度半岛南部的苏门答腊地震同震阶变;此外,2005 年西域地块和青藏地块分界线西侧和 2008 年南北地震带中南段重力变化也比较明显.

为了充分认识这些突出的重力变化现象的特点,在这些区域选取一些点,P01(16.0°N, 77.5°E)、P02(29°N, 78°E)、P03(36°N, 89°E)、P04(43.5°N, 78°E)、P05(31.5°N, 103.5°E)和 P06(26°N, 103°E),其分布见图 2e.利用 2003 年 1 月至 2009 年 4 月(缺少 2003 年 6 月)的 75 个月的重力模型,计算每个月的地球重力场模型相对所有年份的月平均重力场模型的偏差,并利用 500 km 的高斯滤波器进行滤波,获得这些点位的重力变化时间序列(图 3).

这些点位的卫星重力变化有较好的周期性特征,这主要由降水等季节性气候变化引起,但是这并不妨碍获得隐藏其中的其他信息.为了更清楚地分析这些点位的重力变化时间序列,采用最小二乘方法拟合其中的年和半年周期的信号,置信度 95%,获得除去年和半年周期的重力变化(图 4).从图 3a 和图 4a 中不难看出位于印度南部的 P01 点位区域的重力在苏门答腊地震前和后的变化特征没有发生改变,但在这个区域形成一个约 $3 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$ 的重力上升阶变.位于印度板块俯冲带上的 P02 点表现为在苏门答腊地震前趋势变化不明显,而震后重力

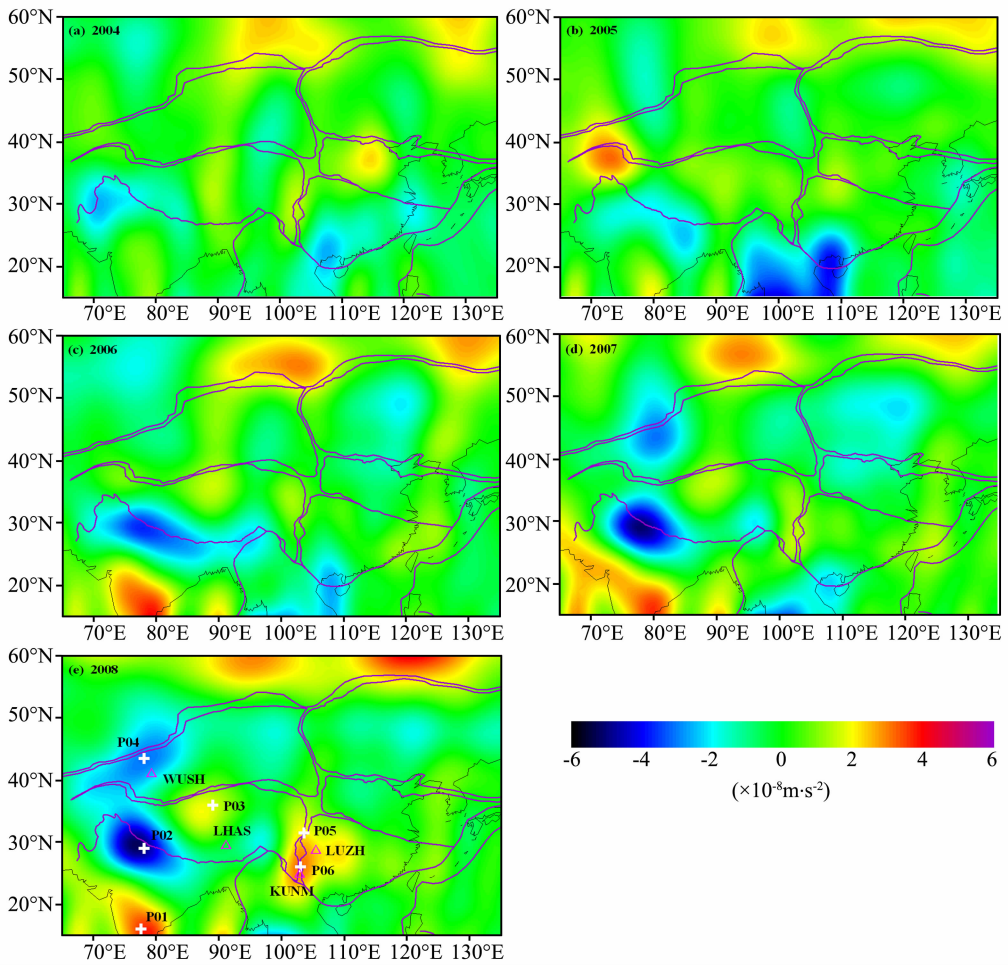


图 2 中国大陆及周边 2004~2008 年的平均重力场变化(相对于 2003 年的平均重力场)

Fig. 2 Annual average gravity changes for 2004 to 2008 in and around Chinese mainland (In reference to the average gravity field in 2003)

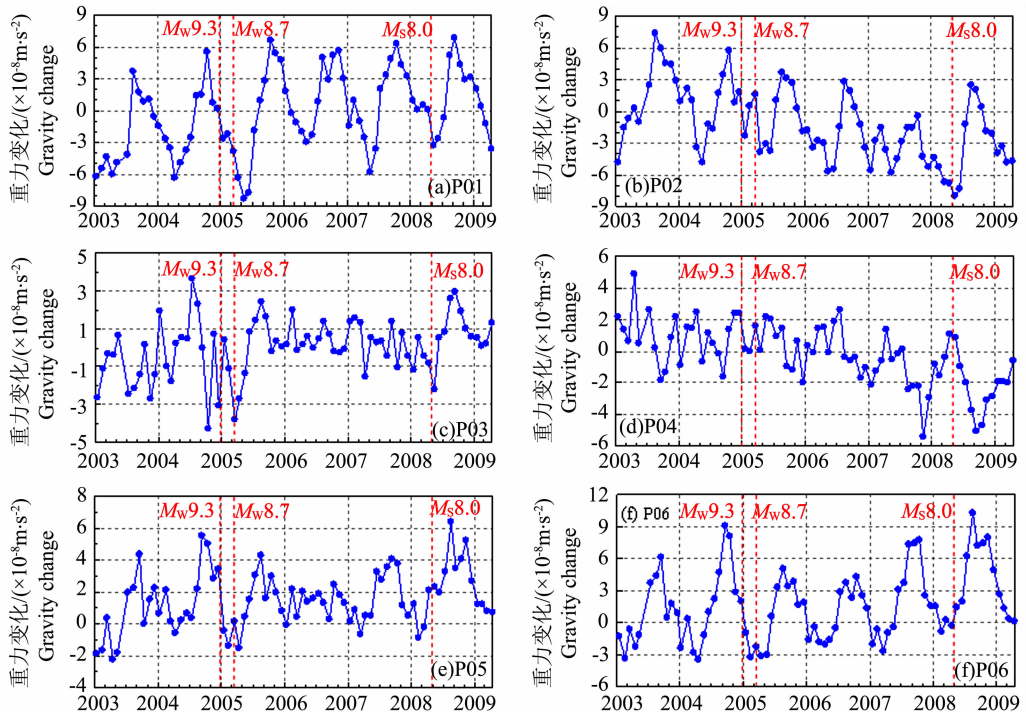


图 3 选定的 P01~P06 共 6 个点位的卫星重力变化时间序列

Fig. 3 Time series of the satellite gravity changes at 6 selected locations P01~P06

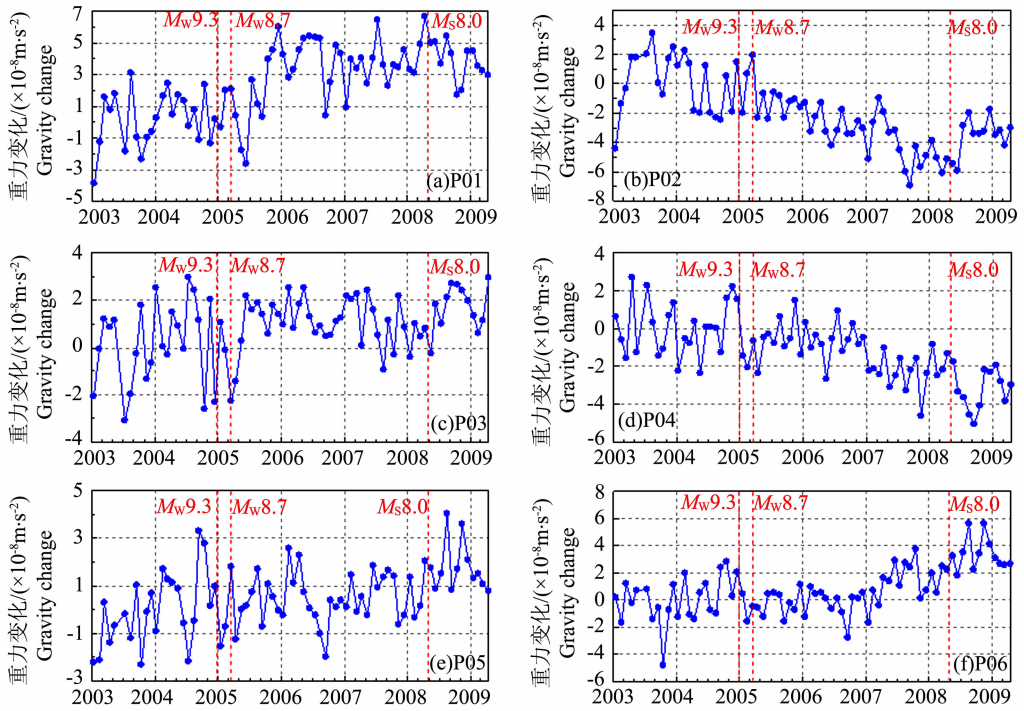


图 4 P01~P06 点位卫星重力变化时间序列年周期、半年周期拟合残差(最小二乘方法拟合,置信度 95%)
 Fig. 4 Time series of the residuals of best fits with annual and semi annual periods for satellite gravity changes at locations P01~P06 (Least square fitting with confidence level of 95%)

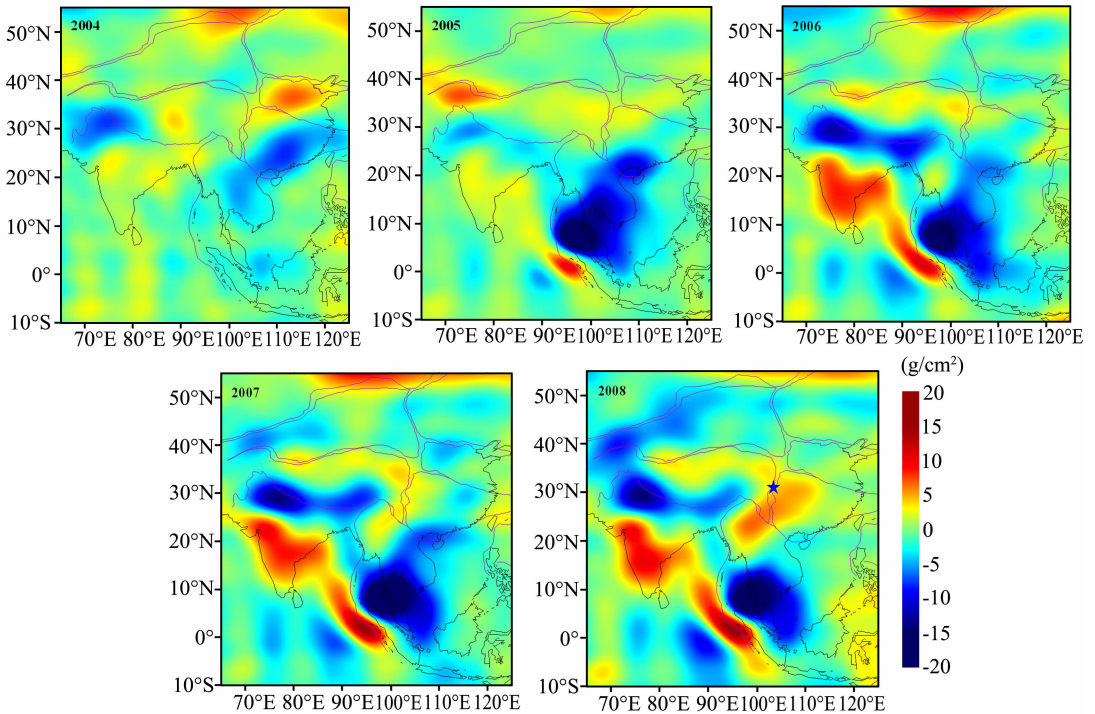


图 5 苏门答腊地震区域和青藏高原及周边地表面密度变化
 (各年的月平均值相对于 2003 年的平均值,蓝色五角星为汶川地震震中)
 Fig. 5 Density changes on the ground surface in the region of the Sumatra earthquake and on and around the Tibetan plateau
 (The monthly averages for each year are in reference to the average in 2003, the blue star is the epicenter of the Wenchuan earthquake)

下降速率明显加快,一直到 2008 年汶川地震发生这种快速下降的趋势才改变. 位于青藏地块内部的 P03 区域也表现出与 P02 区域一样的特征,只是重力下降的速率相对较小. 苏门答腊地震后卫星重力快速下降的特征在位于西域地块西北边界的 P04 点区域也得到表现. 从分别位于汶川震区和南北地震带中南段的 P05 点和 P06 点位区域的卫星重力变化趋势也能看出苏门答腊地震的同震影响,而且 2006 年时间序列的周期变化似有打破,这与该区域这期间较为干旱有关. 所有时间序列都记录到苏门答腊地震和汶川地震的同震重力效应. 尤其 P02、P03 和 P04 位置汶川地震的同震效应明显,且距震源不同距离点位由同震变形效应引起的重力变化出现的时间有所差异. 汶川地震震源区重力似有上升,但幅度很小.

上述 500 km 高斯滤波后的结果显示在苏门答腊地震和汶川地震期间存在大空间尺度的重力异常变化. 为了提高结果的空间分辨率,利用公式(2)并采用 300 km 的 Fan 滤波器^[28]获取了图 1 范围的地表面密度变化(图 5)来研究该区域的地表质量变化. 与图 2 类似,该结果以 2003 年的地表平均面密度变化作为参考. 图 5 清晰地展现了苏门答腊地震同震及震后的重力变化过程. 相对于 2003 年,2005 年苏门答腊地震破裂东边陆地侧地表密度最大下降约 24 g/cm^2 ,而西边海洋侧上升约 12 g/cm^2 ;随后两边均处于上升中. 其变化过程可以从图 6 所示逆冲断层的弹性回跳理论模式和震后黏滞性松弛获得解释. 断层两侧长时间的挤压闭锁,造成上盘地壳的不断隆起,地表密度也随之增加;破裂发震使得积累已久的应力与变形得到迅速松弛,上盘的震前挤压抬升瞬间转变为拉张松弛下沉,这正是震后上盘从断层附近至中南半岛及周边的广大区域出现大范围重力下降的原因,重力下降区域的长轴也正是与发震断层近垂直的方向.

图 5 显示的另外一个明显的动态变化过程是青藏高原及其周边的地表密度变化,从 2005 年起印度板块与欧亚板块相向俯冲的喜马拉雅弧区域地表密度减小加快,尤其是 2006 年该区域地表密度减小幅度最大达约 13 g/cm^2 ;西域地块西北边界 2007~2008 年相比 2003 年地表密度也显著减小,最大达 9 g/cm^2 . 2007 年和 2008 年青藏高原沿其北至东边界构造带的地表密度增加明显,最大增加约 5 g/cm^2 ,构成了与 GPS 在该区域的旋转运动^[15]一致的地表密度增加的分布图形. 而汶川 $M_s 8.0$ 地震正发生在

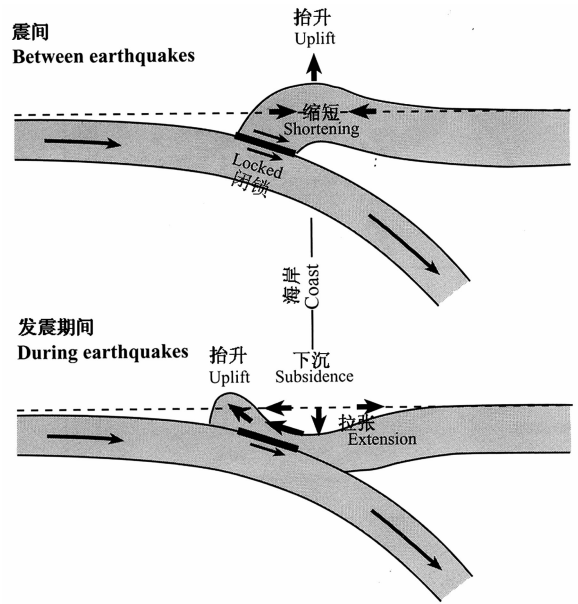


图 6 逆冲断层的弹性回跳理论模式^[29]

Fig. 6 Theoretical model for elastic rebound of a thrust fault^[29]

这个物质密度增加弧形分布的曲率比较大的地带,并且图 5 表明汶川地震期间青藏高原东边界地表密度显著增加达约 7 g/cm^2 .

4 GPS 时间序列显示的位移变化

考虑 GRACE 卫星观测到重力变化比较大的区域,选取 WUSH(41.20°N , 79.20°E)、LHAS(29.66°N , 91.10°E)、KUNM(25.03°N , 102.80°E)和 LUZH(28.87°N , 105.41°E)四个 GPS 台站的资料研究其与卫星重力同时段的位移变化. 采用的 GPS 时间序列的时间段为 2003 年 1 月至 2009 年 4 月,为每周解结果. 从地壳运动的观点来看,ITRF 的结果主要反映全球板块运动,而区域框架坐标(或位移)分量时间序列结果的噪声水平小于全球框架的结果^[30]. 采用区域参考框架除了有利于区域大地测量外,也有利于对区域地壳运动的解释与研究^[31~33]. 本文利用中国地壳运动观测网络数据中心计算的全球参考框架的 GPS 解,获取以中国大陆为参考基准的 GPS 位移时间序列,为讨论卫星重力的时间变化提供参考.

为了直观地表现观测站点位的位移变化,采用水平位移的向量变化来描述有关 GPS 点位在地表的水平运动,并给出其垂直位移时间序列(图 7). 位移的东向、北向和垂向分量的正方向分别为向东、向北和地表向上. 图 7 表明,2004 年 12 月苏门达腊地震造成 WUSH 和 LHAS 站向东北方向的同震水平

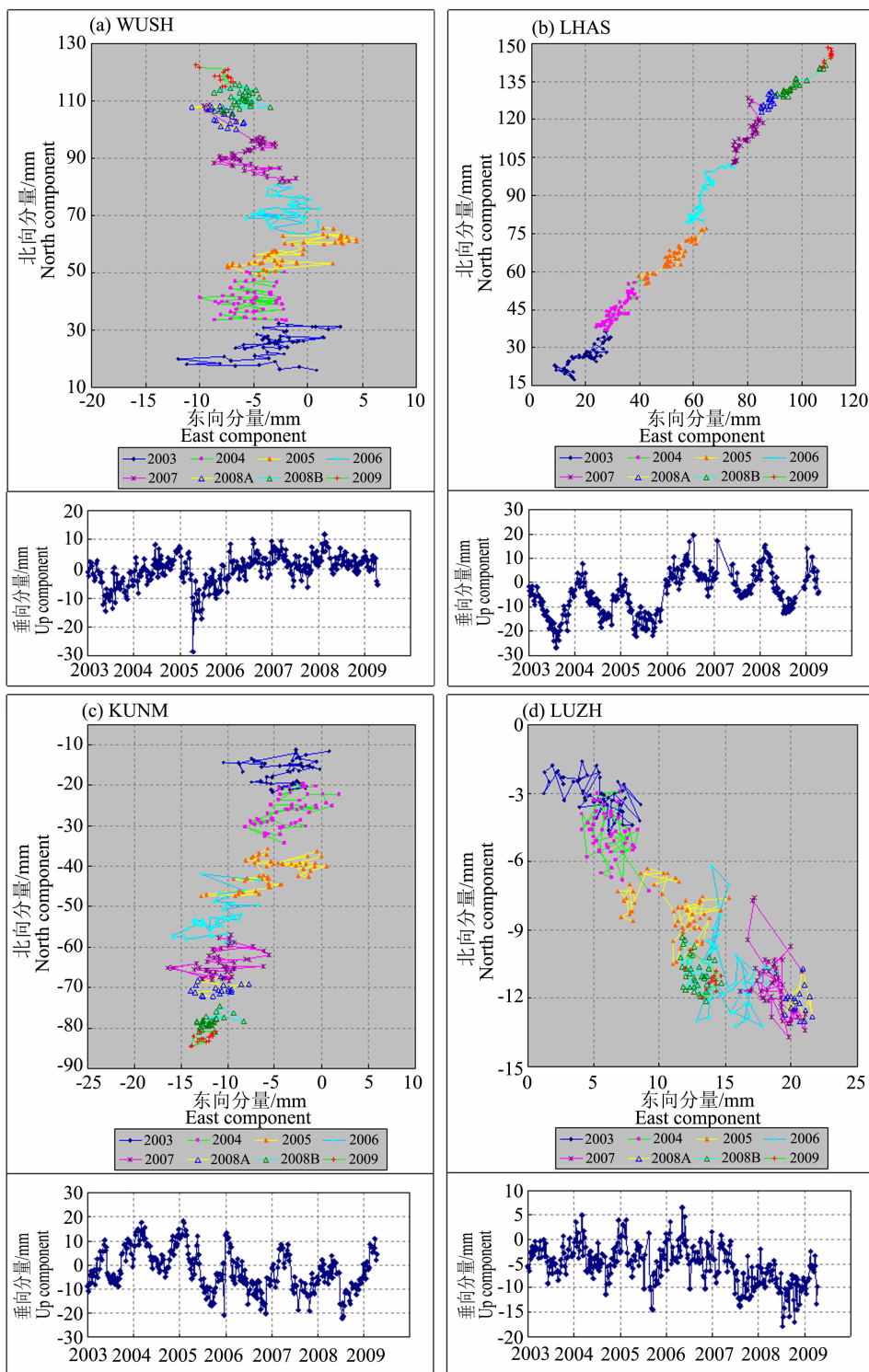


图 7 WUSH、LHAS、KUNM、LUZH 四个 GPS 连续观测站的水平位移向量与垂直位移
(2008A 和 2008B 分别为汶川地震前、后的位移向量)

Fig. 7 Horizontal and vertical displacements at 4 continuous GPS observation stations
of WUSH, LHAS, KUNM and LUZH

(2008A and 2008B are horizontal displacement vectors before and after the Wenchuan earthquake respectively)

位移, 这种同震位移调整了不到一年的时间, 从 2005 年后期 WUSH 站出现显著的西向运动加速, 而

同期 LHAS 站的东向运动速率明显减小, 尤其是 2006 年以向北位移为主. 类似的同震位移变化也在

青藏高原东缘的 KUNM 站出现,从 2005 年开始 KUNM 站西向运动增速;而位于四川盆地的 LUZH 站向东南方向位移,变化幅度相对较小.这种水平位移运动状态一直持续到汶川地震发生才发生改变,WUSH、LHAS、KUNM 都有向东南运动的汶川地震同震位移,LUZH 站则发生明显的向西北运动的同震位移,所有站点的运动在经过半年左右时间的调整后逐渐向苏门答腊地震前的运动状态恢复.

苏门答腊地震在四个 GPS 站点都引起垂直位移变化,这一变化都主要出现在 2005 年 3 月 29 日 M_w 8.7 地震后,LHAS 和 KUNM 站有明显的同震垂直位移阶变,前者为上升、后者下降,而且年变周期明显的 LHAS 站的周期变化受到明显的影响.汶川地震引起 LHAS、KUNM、LUZH 站的垂直同震位移均为下沉,但幅度都很小,而在 WUSH 站未发现明显的汶川地震同震垂直位移.

5 讨论与结论

利用 GPS 获得的运动场表明,中国大陆地壳运动主要是受印度板块和太平洋板块与欧亚板块相互碰撞俯冲产生的力作用的影响^[15,34~36].郭良迁等^[34]计算的相对中国大陆整体 1999~2007 年的运动场显示青藏地块东部运动方向为北东向,而其西部变化为北西向;西域块体的运动为北西向.本文计算的 WUSH、LHAS、KUNM、LUZH 站在这种运动背景下,运动状态在 2005~2006 年发生改变,是否意味着苏门答腊地震后,印度板块对欧亚板块的向北推挤增强、并产生了青藏亚板块的侧向运动,即青藏地块东部向东运动的速率增加,而其西部和西域地块西部的西向运动加速,但东部的东向运动受到四川盆地和华南地块的强烈阻挡,其运动速率明显减缓.这种状态变化在汶川地震发生后才开始逐渐向苏门答腊地震前的趋势恢复.

GRACE 卫星观测到的重力场变化主要由地下水储量变化、构造变形和地下物质流动等三种因素引起.地下水储量变化,包括冰盖融化等引起的地表密度变化,相对较大且比较快.图 3 和图 4 中,点位 P02 所处的区域正好是喜马拉雅山脉,P04 位于天山山脉,这些区域的冰盖融化造成的质量流失对区域重力场的影响比较大,有研究表明近年喜马拉雅冰川融化加速^[37~39],值得关注.本文尚未收集到冰盖融化的有关数据,未对冰盖融化的影响做出定量

估计.但是仅考虑冰盖融化的影响又难以完全解释青藏高原及其周边的重力变化.该区域的重力场状态有明显变化的时间与苏门答腊地震和汶川地震发生的时间比较一致,GPS 位移在相同时段也出现了可以做相应解释的异常变化,而且重力的显著异常变化沿构造变形带分布,这表明重力变化中可能含有由构造运动产生的变形和地下物质运移引起的地表密度变化.当然,青藏高原由于所处构造位置的特点,其地表变形及重力变化的影响因素非常复杂,本文尚未讨论剥蚀及高原坍塌等地质过程的影响,这是今后需要讨论的问题.

结合区域构造运动背景和 GPS 位移时间序列,初步认为青藏高原及周缘的重力异常变化原因可能是:2004 年苏门答腊 M_w 9.3 地震的发生使得印度板块的向北推挤作用增强,青藏高原向北运动加速,造成沿其北边界挤压增强而使得高原进一步隆升,同时地下物质由于压缩而密度增加,这两种作用使得沿边界带重力上升明显.GPS 观测到的苏门答腊地震造成的同震位移均含有向东的运动变化,表明印度板块的同震挤压含有向东的成分,这种挤压和青藏高原内部发育的左旋走滑断层作用使得青藏高原的北东和东边界与北边界一样受到推挤和强烈阻挡产生构造变形且地下物质密度增加,同时这种构造运动还很可能造成中、下地壳的物质沿构造带向东南流动,这几种作用一起使得沿青藏高原北至东边界弧形带重力显著上升(图 5).这种重力上升的弧形分布经历了一个积累过程,在 2006 年开始初步显现,2007 年和 2008 年变得很明显,随着这种汇聚积累的应力显著增强,在重力上升弧形分布曲率较大的地方发生了汶川地震.这与由 GPS 观测的地壳运动获得的汶川地震的动力机制认识是一致的^[34~36].

这些定性的初步认识是基于有限几年的卫星观测所得出,对于认识时间过程很长的构造变形现象难免有局限性.但这几年在研究区域先后发生了多次大地震,这些地震发生的位置又处于特定的构造变形区域.这为研究巨大地震对周边构造活动的影响及地震的触发提供了很好的机遇.2004 年苏门答腊 M_w 9.3 地震引起的同震重力变化和该地震后青藏高原及周边的重力变化异常在 GRACE 观测中是非常清楚的.GPS 时间序列显示苏门答腊 M_w 9.3 地震的同震位移及震后松弛衰减明显,且在它与汶川地震相隔的时间段水平位移也出现了相应的异常变化.位移场和重力场几乎同时段出现大尺度的异常

变化,在某种程度上反映了该区域存在反常的地壳运动、变形和物质运移活动. GRACE 卫星揭示的青藏高原及周缘地下物质密度的变化为认识汶川地震的动力机制提供了新的观测途径和资料.

本文对卫星重力时变场仅进行了观测现象的描述,并结合区域构造运动背景和 GPS 位移观测进行了初步解释. 考虑地表水储量变化和冰川融化等因素影响的卫星时变重力场特征研究和青藏高原及周边时变重力场的理论模型解释是我们今后进一步的工作.

致谢 日本东京大学地震研究所孙文科教授、美国德克萨斯大学空间研究中心陈剑利研究员、四川省地震局闻学泽研究员对本文的研究提出了有益的意见和建议,中国科学院测量与地球物理研究所张子占博士提供了解算的部分卫星地球重力场模型,本文采用中国地壳运动观测网络数据中心的 GPS 计算结果做了进一步的处理与分析,在此一并致谢.

参考文献(References)

- [1] Han S C, Shum C K, Bevis M, et al. Crustal dilatation observed by GRACE after the 2004 Sumatra-Andaman earthquake. *Science*, 2006, **313**(5787): 658~666, doi:10.1126/science.1128661
- [2] Ogawa R, Heki K. GRACE detects coseismic and postseismic deformation from the Sumatra-Andaman earthquake. *Geophys. Res. Lett.*, 2007, **34**, L06313, doi:10.1029/2007GL029340
- [3] Chen J L, Wilson C R, Tapley B D, et al. GRACE detects coseismic and postseismic deformation from the Sumatra-Andaman earthquake. *Geophys. Res. Lett.*, 2007, **34**, L13302, doi:10.1029/2007GL030356
- [4] Panet I, Mikhailov V, Diament M, et al. Coseismic and post-seismic signatures of the Sumatra 2004 December and 2005 March earthquakes in GRACE satellite gravity. *Geophys. J. Int.*, 2007, **171**(1):177~190, doi: 10.1111/j.1365-246X.2007.03525.x
- [5] 祝意青, 梁伟锋, 徐云马. 重力资料对 2008 年汶川 $M_s8.0$ 地震的中期预测. 国际地震动态, 2008, (7):36~39
Zhu Y Q, Liang W F, Xu Y M. Medium-term prediction of $M_s8.0$ earthquake in Wenchuan, Sichuan by mobile gravity. *Recent Developments in World Seismology* (in Chinese), 2008, (7): 36~39
- [6] 祝意青, 徐云马, 吕弋培等. 龙门山断裂带重力变化与汶川 8.0 级地震关系研究. 地球物理学报, 2009, **52**(10):2538~2546, doi: 10.3969/j.issn.00015733.2009.10.012
Zhu Y Q, Xu Y M, Lü Y P, et al. Relations between gravity variation of Longmenshan fault zone and Wenchuan $M_s8.0$ earthquake. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2009, **52**(10):2538~2546, doi:10.3969/j.issn.00015733.2009.10.012
- [7] 申重阳, 李辉, 孙少安等. 重力场动态变化与汶川 $M_s8.0$ 地震孕育过程. 地球物理学报, 2009, **52**(10): 2547~2557, doi: 10.3969/j.issn.00015733.2009.10.013
Shen C Y, Li H, Sun S A, et al. Dynamic variations of gravity and the preparation process of the Wenchuan $M_s8.0$ earthquake. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2009, **52**(10):2547~2557, doi: 10.3969/j.issn.00015733.2009.10.013
- [8] 李辉, 申重阳, 孙少安等. 中国大陆近期重力场动态图像. 大地测量与地球动力学, 2009, **29**(3):1~10
Li H, Shen C Y, Sun S A, et al. Dynamic gravity change of recent years in China continent. *Journal of Geodesy and Geodynamics* (in Chinese), 2009, **29**(3): 1~10
- [9] Wang W, Sun W, Jiang Z. Comparison of fault models of the 2008 Wenchuan earthquake ($M_s8.0$) and spatial distributions of co-seismic deformations. *Tectonophysics*, 2009, doi:10.1016/j.tecto.2009.08.035
- [10] 徐锡伟, 闻学泽, 叶建青等. 汶川 $M_s8.0$ 地震地表破裂带及其发震构造. 地震地质, 2008, **30**(3): 597~629
Xu X W, Wen X Z, Ye J Q, et al. The $M_s8.0$ Wenchuan earthquake surface ruptures and its seismogenic structure. *Seismology and Geology* (in Chinese), 2008, **30**(3): 597~629
- [11] 滕吉文, 白登海, 杨辉等. 2008 汶川 $M_s8.0$ 地震发生的深层过程和动力学响应. 地球物理学报, 2008, **51**(5): 1385~1402
Teng J W, Bai D H, Yang H, et al. Deep processes and dynamic responses associated with the Wenchuan $M_s8.0$ earthquake of 2008. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2008, **51**(5): 1385~1402
- [12] 朱守彪, 张培震. 2008 年汶川 $M_s8.0$ 地震发生过程的动力学机制研究. 地球物理学报, 2009, **52**(2): 418~427
Zhu S B, Zhang P Z. A study on the dynamical mechanisms of the Wenchuan $M_s8.0$ earthquake, 2008. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2009, **52**(2): 418~427
- [13] Tapponnier P, Molnar P. Active faulting and tectonics in China. *J. Geophys. Res.*, 1977, **82**:2905
- [14] 邓起东, 陈社发, 赵小麟. 龙门山及其邻区的构造和地震活动及动力学. 地震地质, 1994, **16**(4): 389~403
Deng Q D, Chen S F, Zhao X L. Tectonics, seismicity and dynamics of Longmenshan Mountains and its adjacent regions. *Seismology and Geology* (in Chinese), 1994, **16**(4): 389~403
- [15] Wang Q, Zhang P Z, Freymueller J T, et al. Present-day crustal deformation in China constrained by Global Positioning System measurements. *Science*, 2001, **294**: 574~577
- [16] 张培震, 邓起东, 张国民等. 中国大陆的强震活动与活动地块. 中国科学(D辑), 2003, **33**(增刊): 12~20
Zhang P Z, Deng Q D, Zhang G M, et al. The strong earthquake activity and the active block of China mainland. *Science in China (Series D)* (in Chinese), 2003, **33**

- (Suppl.): 12~20
- [17] Wahr J, Molenaar M, Bryan F. Time-variability of the Earth's gravity field: hydrological and oceanic effects and their possible detection using GRACE. *J. Geophys. Res.*, 1998, **103**(B12): 30205~30230
- [18] Fantino E, Casotto S. Methods of harmonic synthesis for global geopotential models and their first-, second-, and third-order gradients. *J. Geod.*, 2009, **83**(7): 595~619, doi:10.1007/s00190-008-0275-0
- [19] Franz B. Definition of Functionals of the Geopotential and Their Calculation from Spherical Harmonic Models. Technical Report 09/02, 2009, Deutsches Geo Forschungs Zentrum GFZ
- [20] Chen J L, Wilson C R, Famiglietti J S, et al. Sensitivity of the Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE) time-variable gravity observations. *J. Geophys. Res.*, 2005, **110**, B08408, doi:10.1029/2004JB003536
- [21] Lyard F, Lefevre F, Letellier T, et al. Modelling the global ocean tides: insights from FES2004. *Ocean Dyn.*, 2006, **56**: 394~415
- [22] McCarthy D D, Petit G eds. IERS Conventions (2003). IERS Tech. Note, 2003, vol. 32, Bundesamts für Kartogr. und Geod., Frankfurt, Germany
- [23] Desai S D. Observing the pole tide with satellite altimetry. *J. Geophys. Res.*, 2002, **107**(C11): 3186, doi:10.1029/2001JC00122
- [24] Bettadpur S. Gravity Recovery and Climate Experiment Level-2 Gravity Field Product User Handbook. 2007a, Rep. GRACE 327-734, Cent. for Space Res., Austin, Tex
- [25] Bettadpur S. CSR Level-2 Processing Standards Document for Product Release 04. 2007b, Rep. GRACE 327-742, Cent. for Space Res., Austin, Tex
- [26] Han S C, Shum C K, Jekeli C, et al. Non-isotropic filtering of GRACE temporal gravity for geophysical signal enhancement. *Geophys. J. Int.*, 2005, **163**: 18~25, doi: 10.1111/j.1365-246X.2005.02756.x
- [27] Jekeli C. Alternative Methods to Smooth the Earth's Gravity Field. Tech. Rep. 1981, 327, Dep. of Geod. Sci. and Surv., Ohio State Univ., Columbus, Ohio
- [28] Zhang Z Z, Chao B F, Lu Y, et al. An effective filtering for GRACE time-variable gravity: Fan filter. *Geophys. Res. Lett.*, 2009, **36**, L17311, doi:10.1029/2009GL039459
- [29] Hyndman R D, Wang K. Thermal constraints on the zone of major thrust earthquake failure — the Cascadia subduction zone. *J. Geophys. Res. (Solid Earth)*, 1993, **98**: 2039~2060
- [30] Williams, Simon D P, Yehuda B, et al. Error analysis of continuous GPS position time series. *J. Geophys. Res.*, 2004, **109**(B3): B03412
- [31] Zuheir Altamimi. ITRF2005 and consequences for ETRF2005. EUREF Symposium, June 2007. 6~8
- [32] Geoff Blewitt. Overview of the SNARF Working Group, its activities, and accomplishments. 8th SNARF Workshop AGU Fall Meeting. San Francisco December 11, 2007
- [33] 顾国华, 张晶. 中国地壳运动观测网络基准站 GPS 观测的位移时间序列结果. 大地测量与地球动力学, 2002, **22**(2): 61~67
- Gu G H, Zhang J. Time series of displacements from GPS observation at fiducial station in the crustal movement observation network of China. *Journal of Geodesy and Geodynamics* (in Chinese), 2002, **22**(2): 61~67
- [34] 郭良迁, 李延兴, 胡新康等. 中国大陆地壳运动与汶川 $M_s 8.0$ 级地震孕育的关系. 地球物理学报, 2009, **52**(2): 531~537
- Guo L Q, Li Y X, Hu X K, et al. Crustal motion of Chinese mainland and preparation of $M_s 8.0$ Wenchuan earthquake in Sichuan Province. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2009, **52**(2): 531~537
- [35] 江在森, 方颖, 武艳强等. 汶川 8.0 级地震前区域地壳运动与变形动态过程. 地球物理学报, 2009, **52**(2): 505~518
- Jiang Z S, Fang Y, Wu Y Q, et al. The dynamic process of regional crustal movement and deformation before Wenchuan $M_s 8.0$ earthquake. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2009, **52**(2): 505~518
- [36] 李延兴, 张静华, 周伟等. 汶川 $M_s 8.0$ 地震孕育发生的机制与动力学问题. 地球物理学报, 2009, **52**(2): 519~530
- Li Y X, Zhang J H, Zhou W, et al. The mechanism and dynamics of the generation and occurrence for Wenchuan $M_s 8.0$ earthquake. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2009, **52**(2): 519~530
- [37] Rodell M, Velicogna I, Famiglietti J S. Satellite-based estimates of groundwater depletion in India. *Nature*, 2009, **460**(20), doi:10.1038/nature08238
- [38] Tiwari V M, Wahr J, Swenson S. Dwindling groundwater resources in northern India, from satellite gravity observations. *Geophys. Res. Lett.*, 2009, **36**, L18401, doi: 10.1029/2009GL039401
- [39] 钟敏, 段建宾, 许厚泽等. 利用卫星重力观测研究近 5 年中国陆地水量中空间尺度的变化趋势. 科学通报, 2009, **54**(9): 1290~1294
- Zhong M, Duan J B, Xu H Z, et al. Trend of China land water storage redistribution at medi- and large-spatial scales in recent five years by satellite gravity observations. *Chinese Sci. Bull.* (in Chinese), 2009, **54**(9): 1290~1294