

国际 GGP 计划和武汉超导重力仪观测

许厚泽¹ 孙和平¹

(1 中国科学院测量与地球物理研究所动力大地测量学重点开放实验室, 武汉市徐东路 174 号, 430077)

摘要:介绍了近年来应用部分超导重力仪观测研究地球动力学研究方面的成果, 包括精密测定地球潮汐常数, 研究大气和海洋潮汐信号, 确定地球自由核章动参数和检测地球自由振荡等内容。

关键词:超导重力仪观测; 海洋大气重力信号; 地球自由核章动参数; 地球自由振荡

中图法分类号: P223.6

1 国际 GGP 项目简介

利用高精度重力测量和地球形变测量技术研究地球的运动和动力学机制已成为当今世界大地测量的研究热点。其中获得第一手高精度重力测量资料, 特别是全球大范围内随时间变化的重力测量数据是其关键。超导重力仪是美国 GWR 公司研制的具有高动态线性测量范围、低噪音、小漂移、高稳定性和灵敏度的重力场观测仪器。它利用保持两个超导线圈中的持续电流稳定的特征, 将超导小球漂浮在一个固定位置上, 当重力场产生微小变化而使小球偏离原来的平衡位置时, 电子反馈线路将自动改变控制线圈中的电流大小, 以维持超导球在原有的平衡位置上。这种设计克服了由于机械弹簧的蠕变性、迟滞性和非线性导致的诸如仪器掉格和长期测量不稳定等缺陷。该仪器的发明和在全球范围内的广泛使用为研究地球重力场的精细结构及其物理和力学机制开辟了广阔的前景。

国际大地测量和地球物理联合会(IUGG)下属的地球深部研究小组(SEDI)组织实施了全球地球动力学研究(GGP)计划, 利用全球 19 台超导重力仪长期、连续、稳定和同步观测资料(采用相同的数据采集格式和分析软件)研究地球动力学问题。该项目将利用现有的各国超导重力仪组成全球性观测网络, 对数据进行统一格式采集, 对资

料进行统一分析处理, 精密检测地球重力场短期(周期为几秒)和长期(周期为几年)变化。自 1997 年起, 该项目将进行周期为 6a 的连续观测, 为解释重要自然现象作出重要贡献。这些问题归结为: ①在地球内核中是否存在内重力波(如果液态地核呈中性成层分布), 在地球表面可检测到的重力效应如何; ②全球性大气压力变化及其质量分布对固体地球重力场的影响是什么; ③通过对全球各地的潮汐资料分析, 是否可在地球表面精确测定地球近周日自由晃动; ④海洋负荷变化对重力场观测的影响如何; ⑤在地震过程, 构造运动、海平面变化、冰后回弹过程中伴随着什么样的重力场变化; ⑥在地球表面, 是否可检测到地球自由振荡的重力信息。武汉台站是 GGP 观测网络中亚洲地区的重要台站, 本文介绍我国武汉台站结合国际台站的部分观测成果。

2 武汉站观测资料的分析

在获得高精度固体地球潮汐常数之前, 最重要的是对原始记录作预处理, 在不破坏原始重力潮汐信号的前提下, 剔除混合在记录中的诸如尖峰、突跳和掉格等错误数据以及由地震引起的干扰信号。由于断电和地震等因素会导致记录中断, 解决此类问题是基于潮汐模拟信号实施插值。在原始重力潮汐观测中扣除理论潮汐信号, 获得观测残差系列, 对残差进行修正后再作恢复处理,

最后获得经各种干扰改正后的潮汐观测数据。在完成数据预处理后, 我们可使用国际上推荐的经典的固体潮观测资料分析方法, 根据潮汐波不同的角频率特征和特定的奇偶带通滤波器性质, 滤掉观测资料中的漂移项后再将日波、半日波和三分之一日波等波群从潮汐观测中分离开来。然后利用经典的最小二乘法解算相应的潮汐观测方程, 并求得各波群的潮汐参数(包括振幅因子和相位滞后值)和各波群误差估计值。在数据分析中, 使用了由国际地球潮汐委员会推荐的日本京都大学 Tamura 提供的有 1 200 个潮汐分波组成的高精度引潮位展开数值表。作为一个例子, 图 1 给出了从 2000 年 9 月 1 日开始到 2002 年 12 月 31 日共 20 448 个原始小时的重力潮汐观测图(图 2(a))、理论模拟信号(图 2(b))、台站气压变化(图 2(c))、台站背景噪声(图 2(d))、长周期变化特征(图 2(e))、极移重力效应(图 2(f))、仪器漂移情况(图 2(g))、海洋负荷导致的重力变化效应(图 2(h))。

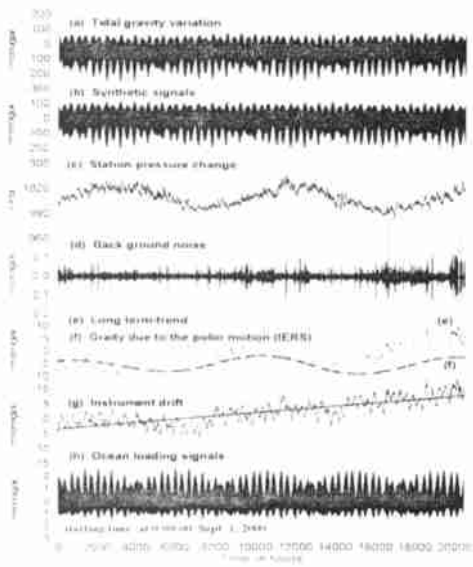


图 1 武汉台站超导重力仪观测、理论潮汐、气压变化、台站背景噪声、极移重力效应、仪器漂移以及海潮负荷影响的时间变化特征

Fig. 1 Temporal Variation Features of the Tidal Gravity Observations Recorded with a Superconducting Gravimeter (SCG), Theoretical Gravity Tides Barometric Pressure, Background Noise, Polar Motion Induced Gravity, Instrument Drift and Loading Effects of the Ocean Tides at Wuhan

由图 1 可知, 武汉站的背景噪声较低, 由超导重力仪观测获得的极移重力效应与由 IERS 预测的结果十分一致, 这说明超导重力仪能有效地检

测极移效应。

3 海潮负荷信号的检测

海洋潮汐和固球地球的潮汐形变均由日月引潮力作用所致, 海水的潮长潮落将导致地球形变和重力场变化, 海潮负荷效应将耦合在重力观测中。80 年代初建立的 Schwiderski 全球海潮模型(简称 Schw80), 首次为大地测量学和地球物理学研究的负荷改正问题提供了较完整的基本海潮数据。研究表明, 由 Schw80 海潮模型计算获得的负荷结果同重力实测结果的相关性可达 90%。自 1992 年以来, 随着 T/P 卫星测高技术 and 有限元方法的应用, 海潮模型的建立更趋完善。因此, 选用高精度海潮图作为高精密度负荷改正已成为国际同行关心的重点。应用 Farrell 负荷潮理论, 孙和平等基于全球网格化海潮图和负荷格林函数褶积计算了重力潮汐观测中海洋负荷的振幅和相位(包括 Schwiderski、CSR3.0、FES95.2、ORI 和 ORI96 等不同的海潮图)。在重力潮汐观测中, 在观测残差矢量(B, β)中扣除海洋负荷信号, 可得到剩余残差矢量(X, χ), 在观测重力潮汐振幅因子和相位滞($\delta, \Delta\varphi$)中扣除海洋负荷信号, 则可得到经海潮负荷改正后的潮汐参数($\delta', \Delta\varphi'$)。

表 1 给出了武汉长超导重力仪观测潮汐分析结果经海潮改正前后的观测残差和潮汐参数。由表 1 可知, 经海潮改正后, 观测残差大大降低了。与理论潮汐模型($O1$ 波: 1.159 3, $M2$ 波: 1.160 1)相比, 8 个主要潮波的振幅因子之差由海潮改正前的 1.38% 降至 0.13% (Csr3.0) 和 0.26% (Fes95.2)。平均相位滞后值由改正前的 $-0.485 0$ 降至 $-0.270 0$ (Schw80)、 $-0.145 0$ (Csr3.0) 和 -0.04 (Fes3.0)。分析说明, 利用不同海潮模型作负荷改正, 特别是由卫星测高技术 (Csr3.0) 和有限元方法 (Fes95.2), 求解提供的海潮资料能更有效地消除重力观测中的负荷影响, 剩余残差矢量更小, 经海潮改正后的重力潮汐振幅因子更接近于理论地球潮汐模型。国际 GGP 计划中的重力潮汐观测为检验海洋潮汐图的可靠性提供了有益的约束。

4 地球液核共振的检测

旋转地球的地幔和液态地核之间的相互作用将产生一个逆向自由核章动 (FCN) 本征模, FCN 的存在将导致地球重力固体潮观测的近周日共

振。根据这一特征,采用超导重力仪观测,可精密确定液核共振周期、品质因子和共振强度。采用观测资料迭积方法,可有效地消除海潮和大气效应改正中那些不确定因素及台站周边局部环境的干扰,为研究地球内部构造提供更好的约束。孙和平和徐建桥等利用 GGP 项目中国际超导重力仪观测结果测定出 FCN 本征周期,其值为 429.0 恒星日,与以前的同类研究结果相吻合,和理论模拟结果相比则偏小约 30 恒星日。由此利用重力手段推断出,液核的真实动力学椭率比流体静力平衡假设下动力学椭率大出 5% 的重要结论。品

质因子为 9 543,与早期利用固体潮观测资料获得的相应结果相比,更接近于利用 VLBI 观测资料得到的结果。所测定的复共振强度为 $(-6.10 \times 10^{-4}, -0.01 \times 10^{-4})^\circ/\text{h}$,基本反映了非弹性地幔的形变特征。我们还研究了使用不同海潮模型对 FCN 共振参数的影响,结果说明对共振周期的影响在 2% 量级,对共振强度的影响在 $\pm 7.7\%$ 量级,海潮模型的不确定性主要反映在品质因子 Q 值和共振强度虚部。通过不同海潮模型改正后,观测资料的“迭积”可部分抵消各海潮模型不确定拟合参数的影响。图 2 给出了由武汉台站超导

表 1 武汉台站超导重力仪观测获得的经海潮负荷改正后的观测残差和潮汐参数

Tab. 1 Observed Residuals and Gravimetric Parameters Obtained from the Tidal Gravity Observations with a SCG at Wuhan after Ocean Tide Loading Correction

潮汐	残差		Schw 80		Csr3.0		Fes95.2		Ori		Ori96	
	B / μGal	β / $^\circ$	X / μGal	χ / $^\circ$	X / μGal	χ / $^\circ$	X / μGal	χ / $^\circ$	X / μGal	χ / $^\circ$	X / μGal	χ / $^\circ$
$Q1$	0.138	-20.4	0.036	-89.9	0.022	-100.1	0.052	-71.3	0.024	91.9	0.022	-97.5
$O1$	0.613	-33.8	0.174	-126.1	0.155	-129.0	0.155	116.9	0.119	129.0	0.151	-118.6
$P1$	0.337	-42.7	0.142	-46.8	0.112	-41.3	0.098	-47.9	0.093	-43.6	0.131	-52.5
$K1$	0.811	-49.1	0.280	-87.6	0.155	-64.6	0.152	-86.9	0.162	-88.8	0.225	-83.8
$N2$	0.224	-43.2	0.121	-82.0	0.096	-91.4	0.044	-57.4	0.181	-106.0	0.099	-85.0
$M2$	1.041	-48.0	0.686	-78.0	0.541	-70.9	0.250	-13.6	0.743	-110.0	0.494	-85.3
$S2$	0.391	-52.3	0.273	-87.5	0.213	-90.7	0.139	-32.7	0.211	-123.6	0.195	-84.5
$K2$	0.083	-72.0	0.090	-126.1	0.070	-129.9	0.036	-146.0	0.093	-133.0	0.059	-124.0
平均	0.455	-45.2	0.225	-90.5	0.171	-89.74	0.116	-42.4	0.203	-48.01	0.172	-91.4
潮汐	δ	$\Delta\varphi/^\circ$	δ	$\Delta\varphi'/^\circ$	δ	$\Delta\varphi'/^\circ$	δ	$\Delta\varphi'/^\circ$	δ	$\Delta\varphi'/^\circ$	δ	$\Delta\varphi'/^\circ$
$Q1$	1.185 9	-0.25	1.161 1	-0.15	1.160 3	0.00	1.164 2	-0.27	1.160 9	0.43	1.160 5	-0.01
$O1$	1.178 7	-0.48	1.156 2	-0.12	1.156 4	-0.08	1.157 4	-0.11	1.157 2	-0.03	1.157 3	-0.10
$P1$	1.171 6	-0.73	1.159 6	-0.25	1.158 5	-0.13	1.157 1	-0.13	1.157 2	-0.09	1.158 2	-0.25
$K1$	1.151 9	-0.63	1.138 3	-0.20	1.139 7	-0.01	1.138 2	-0.03	1.138 1	-0.04	1.138 6	-0.13
$N2$	1.179 6	-0.42	1.165 8	-0.27	1.164 0	-0.16	1.166 4	0.11	1.159 6	-0.52	1.165 0	-0.17
$M2$	1.176 2	-0.42	1.166 2	-0.33	1.166 8	-0.19	1.168 0	0.21	1.159 1	-0.36	1.164 4	-0.17
$S2$	1.169 4	-0.63	1.160 7	-0.56	1.160 1	-0.45	1.164 7	-0.18	1.155 7	-0.38	1.160 9	-0.41
$K2$	1.167 1	-0.32	1.155 9	-0.28	1.157 1	-0.14	1.159 3	0.09	1.154 4	-0.25	1.158 8	-0.11
平均	1.172 6	-0.49	1.158 0	-0.27	1.157 9	-0.15	1.159 4	-0.04	1.155 3	-0.16	1.158 0	-0.17

重力仪观测获得的近周日共振曲线,由图可清楚地看到液核的近周日共振现象。

5 地球自由振荡的检测

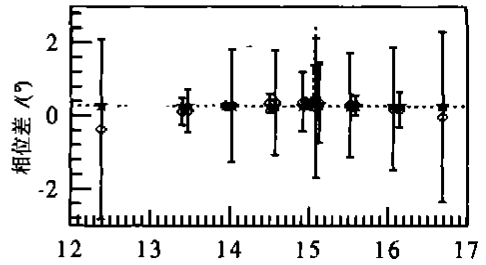
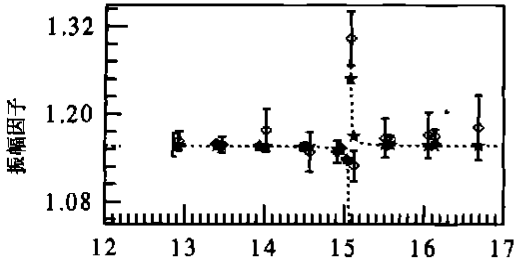
利用地球自由振荡参数可为研究地球内部结构提供重要的背景材料。近年来,国际上十分重视地球自由振荡和地球内部结构关系的研究。一方面由弹性运动方程从理论上研究了自由振荡简正模的周期;另一方面从地球自由振荡观测反演地球密度和拉梅系数。雷湘鄂等利用 2001 年 6 月 23 日秘鲁 7.9Ms 地震期间,武汉、南非的 Sutherland 台、比利时的 Membach 台、芬兰的

Metsahovi 台和奥地利的 Vienna 台的超导重力观测资料(其中 Sutherland 台是双球超导重力仪),基于资料迭积的傅氏分析和最大熵谱分析检测了地球球形自由振荡谱,并准确检测了 ${}_0S_0 \sim {}_0S_{48}$ 的全部振型,有关数值结果见表 2。

由表 2 可知,利用秘鲁 7.9Ms 地震期间测定的振荡周期与 Dziewonski 和 Gilbert 基于 1964 年阿拉斯加地震期间 84 组观测资料获得的结果十分一致。Dziewonski 和 Gilbert 的结果曾被国际上认为是到目前为止地球自由振荡观测最好的典型例子。分析表明,每个振型段的平均相对偏差一般小于 0.5%,最大也不超过 1%,可见,由超导重力仪观测获得的自由振荡简正模非常准确。为方便比较,

表2给出了 Jordan & Anderson 构制的理论模型。该模型是在 HB1 地球自由振荡模型的基础上, 采用 Derr 模型的固态内核, 调节波速和密度使之与体波走时、面波频散和自由振荡周期三种类型的地震学资料符合最佳而得到的。在球对称自由振荡

模型中, 该模型目前被广泛采用。将我们测定的结果与这个模型相比, 发现两者间的平均相对偏差较小。通过比较观测和三组模型中 ${}_0S_0 \sim {}_0S_{48}$ 振型的相对偏差, 发现 ${}_0S_2$ 和 ${}_0S_3$ 的相对偏差较大不是偶然的, 而可能是由内核的各向异性造成的。



(a) 振幅因子

(b) 相位差

注: 两组虚线为近周日共振曲线, ξ 为局部潮汐模型值, \diamond 为武汉台 SCG 测定的重力潮汐参数。

图3 武汉台 SCG 观测的近周日共振曲线

Fig. 3 Nearly Diurnal Resonance Curves Observed with a SCG at Wuhan

表2 测定的球型自由振荡基频振型与其他观测和理论模型比较

Tab. 2 Comparison of the Measured Fundamental Spheroidal Free Oscillations with Other Observations and the Theoretical Models

振型	雷湘鄂等	D & G 等	理论值	振型	雷湘鄂等	D & G 等	理论值
${}_0S_0$	1 227.48	1 227.64	1 227.61	${}_0S_{25}$	297.77	297.71	297.72
${}_0S_2$	3 225.67	3 233.26	3 232.45	${}_0S_{26}$	289.66	289.69	289.74
${}_0S_3$	2 130.24	2 133.58	2 134.13	${}_0S_{27}$	282.30	282.34	282.25
${}_0S_4$	1 547.79	1 547.30	1 545.82	${}_0S_{28}$	275.23	275.06	275.18
${}_0S_5$	1190.51	1190.12	1190.42	${}_0S_{29}$	268.68	268.44	268.49
${}_0S_6$	963.16	963.17	963.72	${}_0S_{30}$	262.24	262.15	262.15
${}_0S_7$	812.31	811.45	812.24	${}_0S_{31}$	256.27	256.00	256.12
${}_0S_8$	707.55	707.64	707.70	${}_0S_{32}$	250.20	250.20	250.38
${}_0S_9$	634.00	633.95	633.69	${}_0S_{33}$	245.16	244.95	244.91
${}_0S_{10}$	579.98	580.08	579.19	${}_0S_{34}$	239.53	239.70	239.67
${}_0S_{11}$	535.92	536.56	536.87	${}_0S_{35}$	234.68	234.69	234.66
${}_0S_{12}$	502.03	502.18	502.34	${}_0S_{36}$	229.69	229.74	229.85
${}_0S_{13}$	473.19	473.14	473.21	${}_0S_{37}$	225.40	225.16	225.24
${}_0S_{14}$	447.92	448.28	448.10	${}_0S_{38}$	220.90	220.62	220.80
${}_0S_{15}$	426.14	426.24	426.16	${}_0S_{39}$	216.58	216.43	216.54
${}_0S_{16}$	406.50	406.77	406.79	${}_0S_{40}$	212.46	212.31	212.43
${}_0S_{17}$	389.60	389.31	389.56	${}_0S_{41}$	208.22	208.05	208.47
${}_0S_{18}$	373.84	373.89	374.10	${}_0S_{42}$	204.64	204.57	204.65
${}_0S_{19}$	360.51	360.20	360.14	${}_0S_{43}$	200.87	200.93	200.96
${}_0S_{20}$	347.87	347.82	347.47	${}_0S_{44}$	197.11	197.19	197.40
${}_0S_{21}$	336.14	336.00	335.88	${}_0S_{45}$	193.79	194.03	193.95
${}_0S_{22}$	325.48	325.31	325.23	${}_0S_{46}$	190.57	190.59	190.62
${}_0S_{23}$	315.51	315.43	315.38	${}_0S_{47}$	187.51	187.43	187.40
${}_0S_{24}$	306.25	306.25	306.24	${}_0S_{48}$	184.11	184.25	184.27

说明: D & G 指的是 Dziewonski 和 Gilbert 的观测结果, 理论值是 Jordan & Anderson 模型。

6 展望

随着 GGP 项目的实施和国际合作的深入, 目前国际上已经积累了 GGP 观测期间各台站超导重力仪的长期观测资料, 其中有些台站(如武汉、Brussels、Membach、Potsdam、Strasbourg 和 Boul-

der 等)的观测资料的积累已超过 10a, 为我们研究和检测全球地球动力学效应奠定了重要基础。有望在如下方面开展更深入的研究: (1) 建立全球高精度重力潮汐实测模型, 澄清目前在潮汐理论模型研究中存在的一些问题(如潮汐参数的纬度依赖因子等); (2) 采用高精度频谱分析方法, 研究和检测包括球型振荡和液核长周期振荡(又称“核

模”)在内的地球简正模,为研究地球内部的构造和液核的平衡机制提供有价值的信息,解决目前国际上有关“核模检测”结果方面存在的争议;(3)用于深入地研究大气、海洋负荷与重力场之间的相互作用和耦合机制;(4)研究地球的自转变化(包括自转和极移以及地球各圈层间的相互作用),这是区别于该领域中空间测量技术和国际地球自转服务的又一独立的重要手段;(5)综合考虑观测手段,有望在震害和构造活动以及海平面变化等研究领域发挥重要的作用。

参 考 文 献

- 1 Ducarme B, Sun H P, Xu J Q. New Investigation of Tidal Gravity Results from the GGP Network. *Bulletin D'informations de Marees Terrestres* 2002, 136, 10 761 ~ 10 775
- 2 Sun H P, Hsu H T, Jentzsch G. Tidal Gravity Observations Obtained with Superconducting Gravimeter and Its Application to Geodynamics at Wuhan/China. *Journal of Geodynamics* 2002, 33(1-2): 187~198
- 3 Sun H P, Chen X D, Xu H Z et al. Accurate Determination of Calibration Factor for Tidal Gravity Observation of a GWR-superconducting Gravimeter. *Acta Seismologica Sinica* 2001, 14(6): 692~700
- 4 Sun H P, Hsu H T, Luo C S, et al. Study of the Ocean Models Using Tidal Gravity Observations Obtained with Superconducting Gravimeter. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica* 1999, 28(2): 115~120
- 5 Sun H P, Luo S C. Theoretical Computation and Detection of the Atmospheric Gravity Signals. *Chinese Journal*

- of Geophysics 1999, 41(3): 405~413
- 6 Sun H P, Takemoto S, Hsu H T, et al. Precise Tidal Gravity Recorded with Superconducting Gravimeters at Stations Wuhan/China and Kyoto/Japan. *Journal of Geodesy*, 2001, 74: 720~729
- 7 Sun H P, Xu H T, Ducarme B, et al. Comprehensive Comparison and Analysis of Tidal Gravity Observations Obtained with Superconducting Gravimeters at Stations in China, Belgium and France. *Chinese Science Bulletin*, 1999, 44(8): 750~755
- 8 Sun H P, Xu H T, Xu J Q. Determination of the New Tidal Parameters Obtained with a Superconduction Gravimeter at Station Wuhan/China. *Journal of the Geodetic Society of Japan* 2001, 47(1): 347~352
- 9 Sun H P, Zhou J C. Correction Problem of the Ocean Loading Signals on Gravity Measurements at Fundamental Stations in Crust Movement Observation Network in China. *Advance in Earth Sciences* 2002, 17(1): 39~43
- 10 Wenzel H G. Earth Tide Data Processing Package ETERNA 3. 30; the NanoGal Software. The 13th Int. Sympos. on Earth Tides, Brussels 1998
- 11 Xu H T, Sun H P, Xu J Q, et al. International Tidal Gravity Reference Values at Wuhan Station. *Science in China (Series D)*, 2000, 43(1): 77~83
- 12 Xu J Q, Sun H P, Luo S C. Study of the Earth's Free Core Nutation by Tidal Gravity Data Recorded with International Superconducting Gravimeters. *Science in China (Series D)*, 2002, 45(4): 337~347

第一作者简介: 许厚泽, 研究员, 中国科学院院士。现从事大地测量和地球物理学研究。

E-mail: hshu@asch.whigg.ac.cn

GGP Project and Observations Using Wuhan Superconducting Gravimeter

XU Houze¹ SUN Heping¹

(1 Key Laboratory of Dynamic Geodesy, Institute of Geodesy and Geophysics Chinese Academy of Sciences, 174 Xudong Road, Wuhan, China 430077)

Abstract: The main tasks of the global geodynamics project (GGP) are introduced. The achievements in tidal gravity observation and its application to geodynamics in recent years are summarized.

Key words: superconducting gravimeter; oceanic loading signal; Earth's free core nutation parameters; Earth's free oscillation

About the first author: XU Houze, professor, member of Chinese Academy of Sciences. He is engaged in the research on geodesy and geophysics.

E-mail: hshu@asch.whigg.ac.cn