

南美 SLR 监测的 2010 年智利 8.8 级大地震产生的地面位移

尹志强^{①*}, 韩延本^{①*}, PODESTÁ Ricardo^②, 刘卫东^①, PACHECO Ana^②, ALONSO Ester^②,
ACTIS Eloy^②, 黄东平^①, 赵励民^①, 王锐^①, 夏金超^①

① 中国科学院国家天文台, 北京 100012;

② Observatorio Astronomico Felix Aguilar, San Juan University, San Juan 5400, Argentina

* 联系人, E-mail: yinzhq@nao.cas.cn; hyb@nao.cas.cn

2010-09-21 收稿, 2010-11-14 接受

科技部国际科技合作项目(2009DFB00130)、中国科学院对外合作重点项目(GJHZ200813)和中国科学院国家天文台青年人才基金资助

摘要 2010年2月27日,智利发生了8.8级特大地震,该地震使震中附近的地面产生了较大位移.德国与智利合作的卫星激光测距系统SLR-7405距震中仅约130 km,其观测受到地震的影响.中国科学院国家天文台与阿根廷合作的SLR-7406系统距震中约600 km,利用这两个SLR站的观测资料并结合全球SLR站的观测资料,在ITRF2000下解算了这两个SLR站点的地心坐标,发现两站的坐标都发生了不同程度的变化.SLR-7405站整体向西南方向发生了较大移动,在X, Y, Z方向上的位移量分别约为3.11, 0.52和0.49 m, SLR-7406站在3个方向上的位移量分别约为0.02, 0.03和0.02 m.由SLR这一独立的观测手段得到的结果可以为其他定位观测提供必要的外部检核.

关键词

地震
卫星激光测距
ITRF2000
地心坐标
南美洲板块运动

2010年2月27日发生于智利的8.8级特大地震,不仅在震区造成了重大破坏,引发了海啸,同时使震中附近的地面产生了明显的位移.据有关报道,人们利用GPS的观测结果计算得到智利接近震中的康塞普西翁(Concepción)市整体向西移动达3 m之多,智利的首都圣地亚哥向西移动了约30 cm,甚至影响到东部的阿根廷,使包括阿根廷首都Buenos Aires在内的一些地方产生了不同程度的向西移动.由于纳斯卡板块(Nazca Plate)和南美大陆板块(South America Plate)的碰撞,安第斯地区中南部的地震活动非常频繁,这一地区也成为地球科学家关注的热点.

目前人们最容易得到的观测板块移动的数据主要来自GPS,同时其他的空间测量新技术,如甚长基线干涉测量(VLBI)和卫星激光测距(SLR)能给出高精度的观测结果,其中SLR是现代各种定位观测手段

中单点采样精度最高的,其观测资料在检测大陆板块的运动、地球重力场变化以及高精度国际地球参考框架(ITRF)的维持等方面都有重要的价值^[1-6].

就智利这次大地震来说,在震中附近的康塞普西翁市设有智利与德国合作的SLR观测站,在国际激光测距服务(ILRS)网中,该仪器的编号为7405.在该仪器东北方向约700多千米处,为阿根廷圣胡安大学天文台所在地,那里设有中国科学院国家天文台与圣胡安(San Juan)大学天文台联合建立的SLR站,其在ILRS网中的编号为7406(图1).

SLR-7405的主望远镜口径为50 cm,自2002年5月开始观测,工作状态良好,观测资料较为丰富,在ILRS网仪器序列中其观测量一般约处于第10位.主望远镜口径为60 cm的SLR-7406为中国研制,2005年底运至阿根廷圣胡安天文台安装调试, San

英文版见: Yin Z Q, Han Y B, Podestá R, et al. South American SLR stations monitoring ground displacement caused by the M8.8 Chilean earthquake of 2010. Chinese Sci Bull, 2011, 56, doi: 10.1007/s11434-010-4324-8

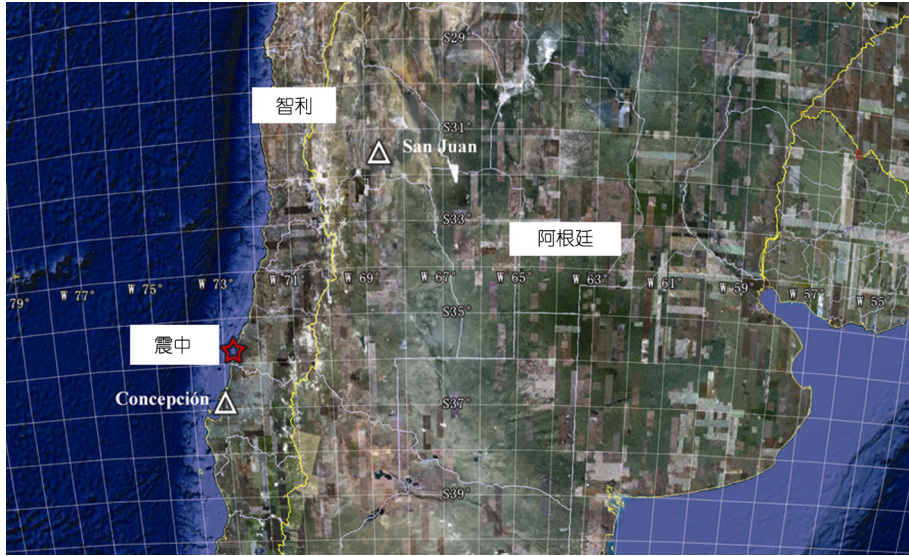


图 1 震中(☆)和 SLR 测站 7405, 7406(△)的位置

Juan 天文台建造了观测室, 该仪器自 2006 年 2 月底开始工作. 中方保持 2~3 名科技人员在那里负责指导仪器的维护, 参加合作观测与研究. 该仪器一直保持着良好的工作状态, 双方人员配合工作, 与圣胡安有利于天文观测的天气条件相结合, 其观测量一般保持在 ILRS 网仪器序列的前 5 名之内^[7].

本文利用这两个 SLR 测站在地震前后对 Lageos-1 卫星的观测资料, 对测站的地心坐标进行了解算, 得到了地震造成的两台站的地面位移量.

1 观测数据

SLR-7405 的地理坐标为: $\phi = -36.843^\circ$, $\lambda = -73.025^\circ$, 距 2010-02-27 智利 8.8 级地震的震中($\phi = -35.7^\circ$, $\lambda = -72.7^\circ$)约 130 km, 地震对该 SLR 观测站造成很大影响, 导致其观测中断. 2010 年 5 月初该仪器恢复了观测. SLR-7406 的地理坐标为: $\phi = -31.509^\circ$, $\lambda = -68.623^\circ$, 与此次地震的震中相距约 600 km, 其观测没有因地震而中断, 它与 SLR-7405 站的距离约为 716 km.

在激光测距观测的目标中, Lageos-1 卫星是专门设计用于地球动力学研究的主要卫星, 也是全球激光测距站重点观测的卫星之一, 观测数据量大、精度高. 为比较地震前后测站的位移变化, 本文选取了 ILRS 发布的 2009-01-01~2010-06-22 时间段内全球 SLR 测站对 Lageos-1 的观测资料(<http://ilrs.gsfc.nasa.gov/>)进行分析, 其中地震后 7405 站的观测数据大约有 2 个月.

2 精密定轨解算站坐标方案

本文在对 Lageos-1 卫星的精密定轨中参考了类似计算中的方案设计^[8,9], 参考系、测量模型和主要力学模型基本遵循 IERS1996 标准.

(i) 力学模型. 在模型中考虑下列摄动因素: (1) 日月引力; (2) 固体潮; (3) 海潮(CSR4.0); (4) 地球形状(GGM02C 地球引力场模型); (5) 太阳光压和地球辐射压(光压系数 C_R 及其变率待估); (6) 类阻力(阻力系数 C_D 及其变率待估); (7) 卫星热迟后辐射; (8) 广义相对论; (9) 地球自转形变. 为了减小在定轨中的模型误差和非模制的力学因素的影响以提高定轨的精度, 在力模型中还增加了径向和沿迹向方向上的两个经验加速度.

(ii) 测量模型. 考虑的是(1) Marini/Murray 大气折射模型; (2) Lageos-1 卫星的归心改正: 0.251 m; (3) 固体潮引起的台站位移; (4) 海潮负荷对台站的影响; (5) 永久潮汐对台站的影响; (6) 地球自转形变对台站的影响.

(iii) 参考系. 采用(1) J2000.0 平赤道(X-Y 平面)和平春分点(X 轴方向); (2) IAU76 岁差; (3) IAU1980 章动模型, IERS 章动改正; (4) DE403/LE403 行星历表; (5) 地球参考框架为 ITRF2000.

(iv) 多级复弧法. 为了提高定轨精度和计算效率, 计算过程采用了多级复弧法. 多级复弧法做了如下设置: 每 15 d 解算一次轨道根数、7405 和 7406 测

站的坐标;每 15 d 解算一次太阳辐射压系数及其线性变化率、地球反照系数;每 3 d 解算一组地球自转参数;每天解算一次类阻力系数、RTN 系数。

3 结果与分析

由于位于震中附近的 7405 观测站在地震后恢复观测到现在只有几个月,为了得到较多的独立解算结果,并考虑观测资料的稳定性,经过实验我们统一选择 15 d 作为一个弧段,对 2009 年 1 月 1 日至 2010 年 6 月 22 日的数据进行精密定轨并解算站点的地心坐标。在 ILRS 发布的数据中,位于澳大利亚的 SLR-7090 站的数据质量一般较高,数据处理中占有较大权重,但其在 2009 年 12 月 7 日、8 日、10 日和 11 日的数据出现了较大的偏差,故在本文的计算过程中剔除了其在那几天的数据,以免影响计算结果。测站坐标只估计 7405, 7406 站,其他 SLR 测站的坐标固定。计算共得到 35 个独立解算的结果,其观测量及定轨残差的统计绘于图 2,总观测量(NOBS)为 114746,平均 NOBS 为 3278,残差的平均 RMS 为

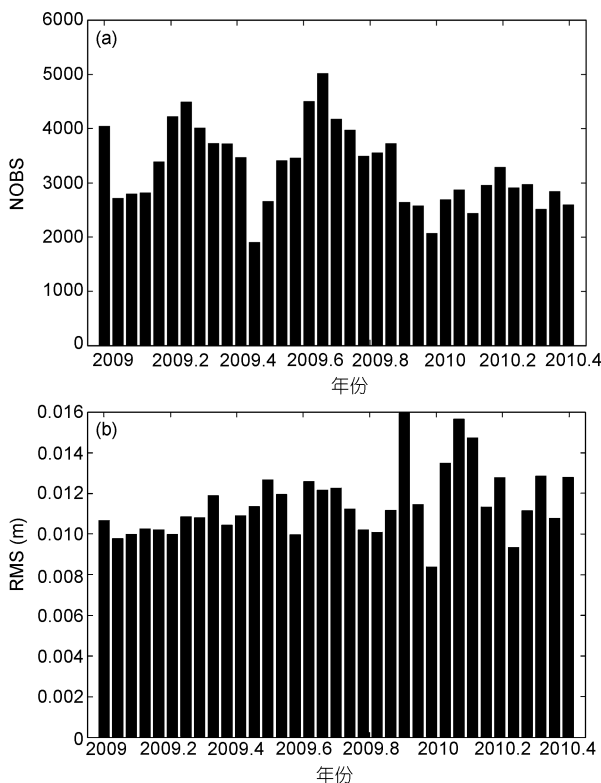


图 2 Lageos-1 卫星每 15 d 弧段观测量统计(a)和定轨残差的 RMS(b)
时间段为 2009-01-01~2010-06-22

0.012 m.

由于全球 SLR 测站对卫星观测所得到的资料密度在时间上并不均匀,本文进一步对 2009 年以来 Lageos-1 卫星的观测数据进行了以天为间隔的解算。解算所采取的定轨方案不变,弧段仍设置为 15 d,由此得到 7405 和 7406 站在 ITRF2000 中的一系列站坐标,结果绘于图 3,其中少量因观测精度低或者观测量太少而使计算出现明显偏差的野值被剔除。

如图 3 所示,2010 年智利 8.8 级地震前后,位于震中附近 Concepción 的 SLR-7405 站发生了明显的位移,其中 X 分量的位移在 3 m 以上, Y 和 Z 分量的位移也达到了约 0.5 m,距 7405 站约 700 km 的 San Juan 7406 站位置也发生了系统的偏移,其中 X 和 Y 分量的变化相对较明显。对上述解算数据做进一步的统计分析,结果列于表 1。

表 1 展示了地震前后两个测站坐标解算的平均结果、标准差(STD)及前后数据之间的差值。 $\Delta X/\Delta Y/\Delta Z$ 的 STD 主要反映了站点坐标解和卫星轨道与该站点观测资料的拟合程度,内符精度在 2 cm 左右。7405 站和 7406 站分别在 2002 年和 2006 后建成,是 ITRF2005 和 ITRF2008 中新加入的站点(<http://itrf.ensg.ign.fr/>)。为了与我们的解算结果比较,我们选取了两个站在 ITRF2008 中的站坐标值,并通过布尔莎(Bursa)七参数转换,求解出其在 ITRF2000, 1997 历元的值,列于表 1 “ITRF08to2k”栏内,可以为我们的解算结果提供外符精度的检验,表 1 结果显示其差值大都优于 2 cm。

4 结论与讨论

纳斯卡板块和南美大陆板块之间的俯冲带属于环太平洋地震带,大地震频发,为地球科学家所关注。位于南美洲的 SRL-7405 和 SRL-7406 观测站是 ILRS 网中的优秀台站。通过对 2010 年智利 8.8 级地震前后这两个测站观测数据的分析解算,发现 SLR 检测到 7405 站在 X/Y/Z 方向上分别发生了 3.11, 0.52 和 0.49 m 的位移,7406 站在 X/Y/Z 方向上也发生了约 0.02, 0.03 和 0.02 m 的移动,这一结果反映了在地震前后与 SLR 固连的地壳表面的局部特征,震中附近位移量较大,远离震中的测站受到的影响较小。由 GPS 解算给出的 Concepción 附近的最大位移为西偏南 3.04 m,本文解算 7405 站观测的资料得到的结果与之相近。San Juan 站目前还没有 GPS 资料, San Juan 站南部更接近震中的 Mendoza($\phi = -32.89^\circ, \lambda = -68.84^\circ$)附近 GPS 检测的位

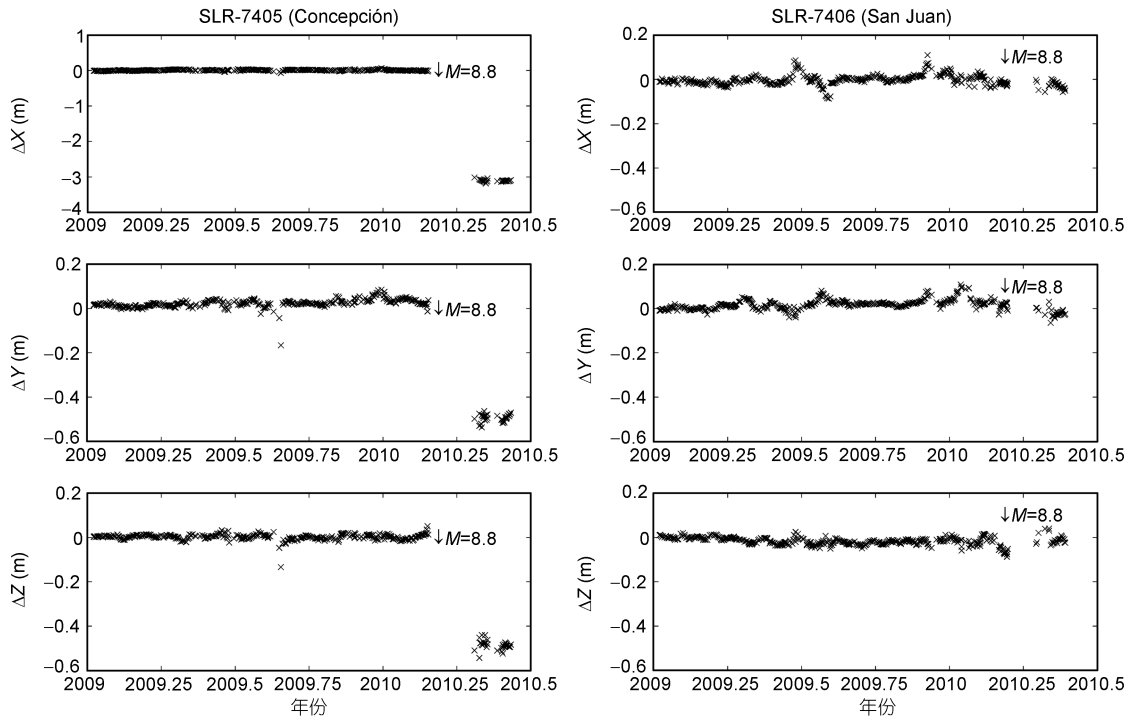


图3 2010-02-27 智利 8.8 级地震前后 Concepción 和 San Juan SLR 站地心坐标 $X/Y/Z$ 的变化

坐标原点为地心, Z 轴指向北极, X 轴指向格林尼治子午面与地球赤道的交点, $X/Y/Z$ 构成右手系; 纵轴 $\Delta X/\Delta Y/\Delta Z$ 为 $X/Y/Z$ 的内符合变化量, 箭头指示地震发生的时刻

表 1 南美洲 SLR-7405 和 SLR-7406 站在 M8.8 地震前后站点坐标在 ITRF2000 中的归算结果^{a)}

	X (m)	Y (m)	Z (m)	$STD_{\Delta X}$ (m)	$STD_{\Delta Y}$ (m)	$STD_{\Delta Z}$ (m)
7405 bef. EQ	1492032.7583	-4887946.0478	-3803566.0389	0.014	0.018	0.012
7405 aft. EQ	1492029.6433	-4887946.5663	-3803566.5262	0.031	0.017	0.020
7405 aft.-bef.	-3.114	-0.5185	-0.4873	-	-	-
ITRF08to2k(7405)	1492032.7512	-4887946.0714	-3803566.0414	-	-	-
7405 bef. EQ-ITRF	0.0071	0.0236	0.0025	-	-	-
7406 bef. EQ	1984104.2205	-5068867.1380	-3314482.6836	0.022	0.022	0.015
7406 aft. EQ	1984104.1988	-5068867.1653	-3314482.6986	0.014	0.023	0.031
7406 aft.-bef.	-0.0217	-0.0273	-0.015	-	-	-
ITRF08to2k(7406)	1984104.2214	-5068867.1582	-3314482.6687	-	-	-
7406 bef. EQ-ITRF	-0.0009	0.0202	-0.0149	-	-	-

a) bef. EQ 表示 2010 年 2 月 27 日地震前的数据统计; aft. EQ 表示地震后的数据统计

移量为 13 cm, 更远离震中靠近 San Juan 的另一个 GPS 测站的位移量为 5.5 cm (http://www.soest.hawaii.edu/soest_web/soest.news_chile_feb2010_eq.htm), 本文解算的 SLR-7406 位移量约为 2 cm 量级, 可以与之相互对比. 由 SLR 解算得到的结果可以作为独立的观测手段为 GPS 等其他定位测量提供外部的检核. 另外, 从这次地震后两站观测资料的解算结果来看(图 3), 两站的位移速度似乎也发生了变化, 但是由于观测时间较短, 得到

的有效数据还比较少, 还有待进一步的分析研究.

此次地震发生在纳斯卡板块和南美大陆板块的俯冲带上, 属典型的逆冲型地震, 两个板块以每年 8 cm 的速率汇聚, 南美板块长时间受到挤压所积累的巨大能量的释放导致地震的发生^[10,11]. 值得注意的是, 在 ITRF2005 给出 7405 站 $X/Y/Z$ 方向的速度值分别为 0.0319, -0.0014, 0.0171 m/a, ITRF2008 给出 7405 站 $X/Y/Z$ 方向的速度值分别为 0.0349, -0.0015,

0.0169 m/a. ITRF2005 归算所采用的数据截止到 2005 年底, ITRF2008 归算所采用的数据截止到 2008 年底, 二者都表明 7405 站 X 方向的速度值最大, 这在一定程度上反映了此地区南美板块受纳斯卡板块挤压的运动特性. 地震发生时, 南美板块逆冲到纳斯卡板块之上, SLR 检测到地震使位于南美板块的 7405 台站在 X 方向发生的最大位移近 3 m.

智利及其周边地区的强震主要集中在纳斯卡板块和南美板块的俯冲带上, 历史记录从 1570 年以来共发

生 7.0 级以上强震 120 余次. 有研究表明, 目前该地区可能开始了一个新的大震活跃期, 未来 3~4 年内可能还会发生一次 8 级以上的地震^[10], 应该予以高度关注. 德国设在智利的观测站有 SLR, VLBI, GPS 等做并置观测, 多种测量手段的并置观测对开展有关的科学研究将更有价值, 我们很快将会在国家天文台与阿根廷圣胡安大学合作的 SLR 系统附近设置固定的 GPS 跟踪站, 开展两种仪器的并置观测, 同时利用 SLR, GPS 等观测资料开展相关研究工作^[7,12,13].

参考文献

- 1 Dong D N, Yunck T, Heflin M. Origin of the international terrestrial reference frame. *J Geophys Res*, 2003, 108: 2200–2209
- 2 秦显平, 杨元喜, 王刚, 等. SLR 资料精密测定 GLONASS 卫星轨道. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2003, 28: 440–443
- 3 朱元兰, 冯初刚. 用 Lageos 卫星 SLR 资料解算地球定向参数及监测地球质心的运动. *测绘学报*, 2005, 34: 19–23
- 4 Feissel-Vernier M, Le Bail K, Berio P, et al. Geocentre motion measured with DORIS and SLR, and predicted by geophysical models. *J Geodesy*, 2006, 80: 637–648
- 5 Coulot D, Pollet A, Collilieux X. Global optimization of core station networks for space geodesy: Application to the referencing of the SLR EOP with respect to ITRF. *J Geodesy*, 2010, 48: 31–50
- 6 郭金运, 韩延本. 由 SLR 观测的日长和极移季节性和年际变化(1993~2006 年). *科学通报*, 2008, 53: 2562–2568
- 7 韩延本, 刘卫东, Actis E, 等. 中国科学院国家天文台 SLR 在阿根廷成功运转. *科学通报*, 2008, 53: 386–389
- 8 冯初刚, 蔡五三, 朱元兰, 等. 中国卫星激光测距流动站地心坐标的归算. *科学通报*, 2003, 48: 1402–1404
- 9 Schillak S, Wnuk E. The SLR stations coordinates determined from monthly arcs of LAGEOS-1 and LAGEOS-2 laser ranging in 1999–2001. *Adv Space Res*, 2003, 31: 1935–1940
- 10 任俊杰, 周娜. 2010 年智利大地震及历史地震活动与地质构造背景. *国际地震动态*, 2010, 375: 1–7
- 11 张勇, 许力生, 陈运泰. 2010 年 2 月 27 日智利地震破裂过程快速反演. *地震学报*, 2010, 32: 242–244
- 12 刘卫东, 韩延本, Podestá R, 等. 用于中阿合作的卫星激光测距(SLR)系统的现状和未来. *天文研究与技术*, 2009, 6: 1–7
- 13 Liu W D, Han Y B, Podestá R, et al. Actuality and futuruty of San Juan 7406 station cooperation between China and Argentina. In: Schillak S, ed. *Proceedings of the 16th International Workshop on Laser Ranging*, 2008 Oct 13–17, Poznań. Warsaw: Space Research Centre, Polish Academy of Sciences, 2009. 535–537