

周 新,孙文科,付广裕.重力卫星 GRACE 检测出 2010 年智利 M_w 8.8 地震的同震重力变化.地球物理学报,2011,54(7):1745~1749,DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2011.07.007

Zhou X, Sun W K, Fu G Y. Gravity satellite GRACE detects coseismic gravity changes caused by 2010 Chile M_w 8.8 earthquake. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2011, 54(7):1745~1749,DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2011.07.007

重力卫星 GRACE 检测出 2010 年智利 M_w 8.8 地震的同震重力变化

周 新¹,孙文科^{1,2},付广裕³

1 中国科学院研究生院地球科学学院,北京 100049

2 中国科学院计算地球动力学重点实验室,北京 100049

3 中国地震局地震预测研究所,北京 100036

摘 要 本研究通过对重力卫星 GRACE 观测数据的处理,采用去相关加 300 km 半径的高斯平滑,成功地提取了 2010 智利 M_w 8.8 地震所产生的重力变化信号,最大变化幅度达到 $7 \mu\text{Gal}$,并且与位错理论计算结果具有较好的一致性.这是继 GRACE 检测出 2004 苏门答腊 M 9.3 地震重力变化后的又一个卫星观测地震的例证,说明 GRACE 具有检测出 $M < 9.0$ 量级地震的能力,为利用 GRACE 研究地震以及其更广泛的应用提供了可靠的依据.

关键词 GRACE,同震重力变化,智利地震,位错理论

DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2011.07.007

中图分类号 P227

收稿日期 2010-10-14,2010-12-28 收修定稿

Gravity satellite GRACE detects coseismic gravity changes caused by 2010 Chile M_w 8.8 earthquake

ZHOU Xin¹, SUN Wen-Ke^{1,2}, FU Guang-Yu³

1 College of Earth Science, Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

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

3 Institute of Earthquake Science, China Earthquake Administration, Beijing 100036, China

Abstract The study successfully processed GRACE data using de-correlation and 300km radius Gaussian smoothing and extracted the coseismic gravity changes caused by the 2010 Chile M_w 8.8 earthquake. The peak to peak amplitude is $7 \mu\text{Gal}$ for gravity and the results agree well with that calculated using a dislocation theory for a spherical earth model. It is a new illustration of GRACE in detecting coseismic signals since it successfully detected the coseismic gravity changes caused by the 2004 Sumatra M 9.3 earthquake. The result reported in this paper implies that GRACE is capable of detecting a coseismic signal caused by a magnitude $M < 9.0$ earthquake, and it is expected a wide application in studying seismic mechanism and other geophysical investigations.

Keywords GRACE, Coseismic gravity changes, Chile earthquake, Dislocation theory

1 引言

2010年2月27日发生在智利中南部的 M_w 8.8 地震,是现代地震记录以来智利自 1960 年 M_w 9.5 地震后的第二大地震,也是全球第五大地震^[1]. 该地震发生在太平洋板块俯冲带上,破裂面长达约 600 km,宽度约 200 km. 智利地震虽然比 2010 年海地地震强烈很多(约 100 倍),由于发生在人口密度相对较低的地区,其产生的伤亡没有海地地震惨重. 地震产生的海啸达到 2.6 m,对智利海岸破裂带造成了永久形变(http://www.unavco.org/research_science/science_highlights/2010/M8.8-Chile.html [2010-08-02]). Farias M 等^[1]在现场观测到同震垂直位移最大达到 2.5 m. 该地震所产生的重力变化能否被现代大地测量技术(如重力场探测卫星 GRACE—Gravity Recovery and Climate Experiment)观测到是人们感兴趣的问题之一.

GRACE 曾成功地检测出了 2004 年苏门答腊 M_w 9.3 地震的重力信号,这也是人类第一次利用现代大地测量技术从空间直接观测到同震重力变化^[2]. Han 等^[2]处理了覆盖震区的 GRACE Level-1B 星间距离和距离变化率数据,利用滤波技术有效地避免了 Level-2 球谐系数的南北条带现象,得到了 $15 \times 10^{-8} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ 的同震重力变化,并利用均匀半无限空间的地壳扩张模型解释了 Adaman 海域的重力减小. 随后,许多学者利用 GRACE 对该地震进行了同震和震后重力场变化的研究^[3-6],例如,De Linage 等^[6]总结了上述几位学者的工作后,利用 GRGS (Groupe de Recherche en Geodesie Spatiale) 的重力场反演解,在同震和震后多项式拟合中考虑 S_2 波的影响,成功地将重力场的同震和震后信号分离,且与 SNREI(非自转、球型分层、各向同性、理想弹性)地球模型下简正模解求和得到的同震变化一致.

自从 GRACE 检测出苏门答腊地震所伴随的重力变化信号以来,人们一直在探索 GRACE 能否检测出比苏门答腊地震更小的地震所产生的重力变化信号. Gross 和 Chao 用地球自由震荡简正模解证明了 GRACE 能够检测出大地震^[7]. 根据 Sun 等的研究结果^[8,9],理论上大于 M 9.0 的剪切源或大于 M 7.5 的张裂源地震的同震重力变化应该能被 GRACE 探测到. 由于任何地震(无论剪切型或者张裂型)均包含剪切型和张裂型震源的独立解成分^[8,9],理论上,一个 M 8 以上的地震均有可能被 GRACE 检测出来.

然而,除了 2004 年苏门答腊 M_w 9.3 地震以外,目前很少有报道 GRACE 观测到了更小的地震. 尽管人们对汶川地震等进行过尝试,都没有得到明显的结果. 2010 年智利 M_w 8.8 地震是 GRACE 观测记录以来在量级上仅次于 2004 年苏门答腊地震,且同样发生在大洋俯冲带上,这为人们进一步探索 GRACE 的观测能力,即能否检测到该地震所伴随的重力变化信号,提供了一个难得的研究机会.

2 数据及处理方法

本研究采用 CSR 发布的 Level2 RL04 GSM 数据,该数据每月给出了完全规格化后的球谐系数,最大阶数为 60^[10]. RL04 在 RL01 的基础上对重力背景场、海洋潮汐、极潮等模型进行了改进,还去除了大气和海洋的非潮汐部分影响,除了计算误差和无法用模型扣除的物理信息外,其时变重力场模型主要反映了地球的质量变化^[5]. 由于 GRACE 的轨道形状对系数 C_{20} 项不敏感,该项精度相对较低,我们用人工激光测距得到的 C_{20} 项作为替代.

需要指出的是,由于重力卫星具有一定的轨道高度,该处的重力信号随轨道高度而衰减,所以重力卫星获得的仅仅是同震引力位或者重力变化的中长波长分量,其高频分量因衰减而变得非常弱,以至于小于观测误差. 再由于 GRACE 卫星重力场的球谐系数解中高阶部分的噪声影响,在时变重力场图像上表现为经度方向的条带现象. 为了有效地提取重力场信息,需要对 GRACE 时变重力场做平滑处理、提高信噪比. 鉴于球谐系数奇偶阶的相关性与条带存在的关系^[11],我们采用了 Chen 等^[5]的滤波方法,即对 6 次以上的球谐系数将奇偶阶分别用三次多项式进行最小二乘拟合,然后将拟合多项式从原始数据中去除(P3M6),再对新的球谐系数做 300 km 半径的高斯平滑处理得到重力场变化. 值得注意的是,因为把 GRACE 卫星重力场的高频部分做了有效压制,突出中长波部分信号提高信噪比,这样计算的同震重力变化信号就比地表面的重力变化信号要小很多.

3 结果与讨论

3.1 GRACE 同震变化

目前 GRACE RL04 数据公布到 2010 年 6 月,我们利用上述方法在 $1^\circ \times 1^\circ$ 的网格计算了 2003~

2010 年每月(2003 年 6 月数据缺失)扣除平均重力场(2003.1~2009.12 作为背景场)后的智利地区重力变化.为了压制重力场的季节性变化,并突出同震信号,震前数据取 2003~2009 年每年 3~6 月重力变化的平均值,震后数据取 2010 年 3~6 月的平均值,取震后与震前平均值的差值得到同震重力变化.图 1 给出了经过 300 km 半径的高斯平滑处理的同震重力变化空间分布结果,黑色五星符号代表震中,黑色线框表示断层.与苏门答腊地震相似,该地震在断层的俯冲区域(断层面上方地表,陆地部分)与隆起区域(断层面下方,海洋部分)分别产生两个明显的符号相反的重力变化,俯冲区为负,隆起区为正.

为了观察重力变化的时间特征,在图 1 中我们在重力变化最大和最小区域分别选取两个点 A (-39.5°N , 284.5°E)和 B (-35.5°N , 290.5°E)(标记为三角形),并计算在 2003 年 1 月至 2010 年 6 月的每月重力相对平均重力场变化的时间序列,其中 2010 年 2 月(即地震发生当月)数据排除在外.我们用多项式模型对固定点的时间序列通过线性最小二乘拟合剔除季节变化,模型中包括常数项、长周期、年变化、半年变化,对于震后加上同震形变项和震后指数衰减项.考虑到与苏门答腊地震的相似性,假定震后松弛时间常数为 0.7 年.计算的重力变化时间序列结果绘于图 2.结果表明,与 2004 苏门答腊地震一样,在智利地震前后表现出了明显的同震重力变化,振幅范围达到 $7 \mu\text{Gal}$,其中,处于隆起区 A 点的同震重力变化约为 $2 \mu\text{Gal}$,而俯冲区 B 点的同震重力变化为 $-5 \mu\text{Gal}$.表明俯冲区的重力变化(或者质量再分布)较隆起区更为显著,这与 2004 苏门答腊地震的结果基本一致^[6].从时间上看,在震后的重力变化有明显增强的现象:A 点重力继续增加, B 点则继续减小,这可能与震后断层的余滑作用,以及震后黏滞调整有关^[6].由于震后 GRACE 观测数据较少,目前还无法准确地体现出震后时间变化特征.

考虑到海洋、海潮和大气等模型的不确定性,GRACE 得到的同震重力变化信号中包含有海洋和大气等其他物理因素的扰动,这些都会影响 GRACE 同震重力变化的精度.理论上 $M8$ 以上的地震都有可能被 GRACE 检测出,由于其他物理噪声的干扰,GRACE 数据在滤波平滑处理后,许多大于 $M8$ 的地震(如汶川 $M8.0$ 地震)同震重力变化信号小于噪声引起的误差.结合 2004 Sumatra 地震、2008 汶川地震和 2010 智利地震,综合考虑多方面

因素,300 km 高斯平滑后 GRACE 同震重力变化的精度在 $\pm 2\sim 3 \mu\text{Gal}$ 范围内比较合理.

3.2 位错理论结果

为了说明上述 GRACE 观测结果的可靠性,我们进行了理论模拟计算.采用 Sun 和 Okubo^[12]的关于 SNREI 地球模型的位错理论,计算了地球表面空间固定点的同震重力变化.该理论定义了位错 Love 数,给出 4 个独立点源的格林函数,通过对有限断层进行数值积分^[13]得到同震重力变化.计算中采用了 USGS 在 2010 智利地震后公布的有限断层模型作为断层参数(http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eqinthenews/2010/us2010tfan/finite_fault.php [2010-08-02]).在该模型中断层面积为 $540 \text{ km} \times 200 \text{ km}$,由 180 个等间距不同位错量和滑移方向的点源位错来描述.GRACE 卫星在地球外部,观测到的重力位变化部分,与地表需要考虑地表面形变效应有所不同,它不包括地表面形变重力效应,但是包括了因形变产生质量重新分布的重力效应.因此应采用空间固定点的同震重力变化计算方法,即在变形地表面重力变化结果的基础上,减去因地表面垂直位移产生的自由空气改正部分.特别指出的是海洋部分需要进一步考虑因海底位移产生海水扰动的重力作用,即将这部分海水扰动看作厚度为垂直位移的不可压缩的 Burger 层,计算其重力扰动并加以改正即可.海水负荷形变影响量级小于海水扰动,可以忽略不计.为了与 GRACE 比较,我们对位错理论计算结果在空间域中也进行 300 km 高斯平滑.由此计算而得到的同震重力变化结果绘于图 3.

图 3 表明,在断层西南隆起区重力表现为正变化,最大幅度为 $3.9 \mu\text{Gal}$,位于(-37.5°N , 284.5°E);在断层俯冲区出现负同震重力变化,为 $-8.9 \mu\text{Gal}$,位于(-35°N , 289°E).比较图 1 和图 3 可知,理论计算的同震重力变化(图 3)与 GRACE 观测结果(图 1)无论在分布形态上还是在量级上都具有较好的一致性.实际观测结果(图 1)表明,最大变化幅度约为 $7 \mu\text{Gal}$;理论模型计算结果表明(图 3),最大变化幅度约为 $13 \mu\text{Gal}$;理论模型值与实际观测值的差异是 $6 \mu\text{Gal}$.这个差异可以认为主要来自于以下几个原因:一是震后 GRACE 数据资料较短,目前的资料长度还无法将同震信号与震后信号有效分离;二是地震断层模型不精确;三是和 2004 苏门答腊 M_w 9.3 相比震级和同震变化信号均相对较小^[2,3,5,6],相应的海洋和大气扰动所产生的噪声背景相对较大,因而误差也相对较大.需要指出的是,GRACE

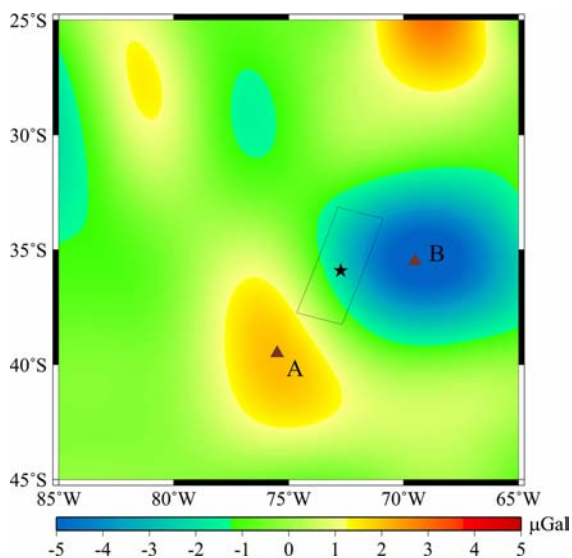


图1 GRACE 检测出的 2010 年 2 月 27 日智利 M_w 8.8 地震的同震重力变化空间分布

Fig. 1 Coseismic gravity changes' spatial distribution of Chile M_w 8.8 earthquake 2, 27, 2010 detected by GRACE

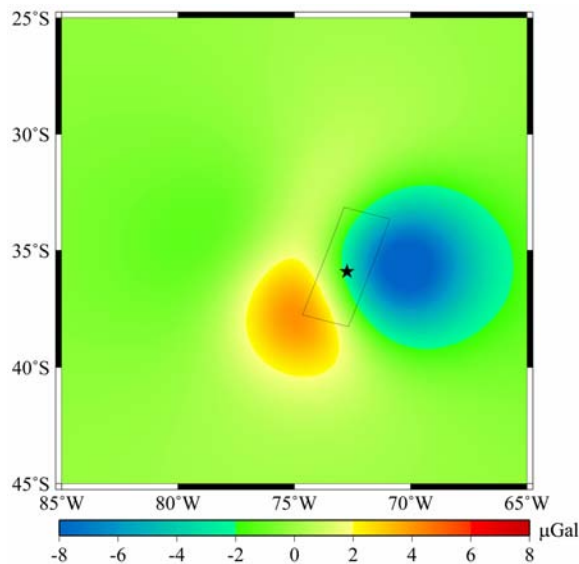


图3 利用位错理论计算的 2010 年 2 月 27 日智利 M_w 8.8 地震所产生同震重力变化

Fig. 3 Coseismic gravity changes of Chile M_w 8.8 earthquake 2, 27, 2010 calculated by dislocation theorem

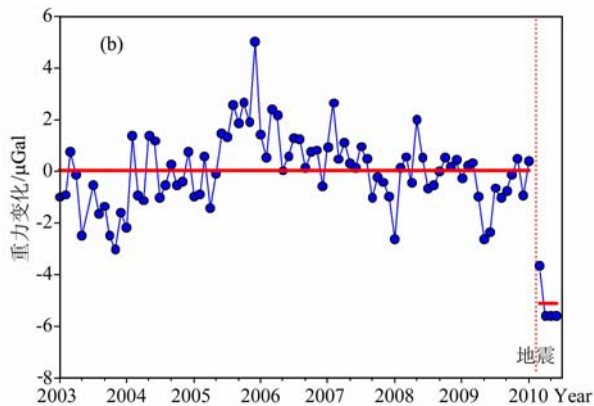
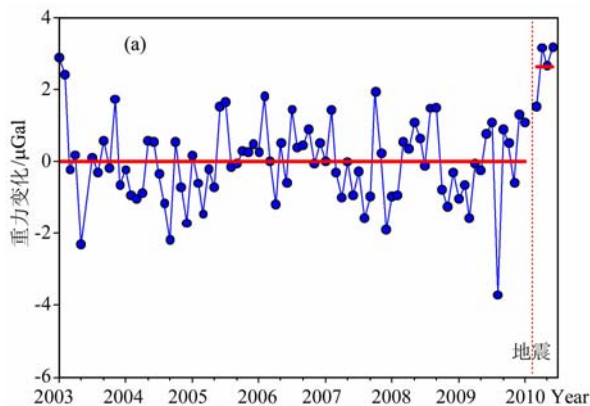


图2 2010 年 2 月 27 日智利 M_w 8.8 地震所产生同震重力变化的时间序列

(a) 图1 中点 A ($-39.5^{\circ}N, 284.5^{\circ}E$) 处的重力变化; (b) 图1 中点 B ($-35.5^{\circ}N, 290.5^{\circ}E$) 处的重力变化

Fig. 2 Time series of coseismic gravity changes caused by Chile M_w 8.8 earthquake 2, 27, 2010

(a) Gravity changes at A ($-39.5^{\circ}N, 284.5^{\circ}E$); (b) Gravity changes at B ($-35.5^{\circ}N, 290.5^{\circ}E$),

the two selected grid points depicted in Fig. 1.

观测数据中同震和震后有很强的相关性^[6],因受到 GRACE 震后数据长度的限制,我们无法更精确地确定震后变化和同震变化信号的相关性.图1结果是震前震后同期数据平均取差而得到的,能够消除季节性因素,却无法精确地去除长期影响和震后余滑效应(包括余滑、震后黏弹性松弛和孔隙弹性回弹).我们在图2的 A、B 点的时间序列拟合模型中加入了震后指数衰减项,限于震后的数据时间长度我们假设松弛时间与苏门答腊相同为 0.7 年,这与实际震后效应或有偏离,却并不妨碍与理论同震变化的一致性.若要更精确地提取同震和震后重力变

化,还需更长时间的震后观测数据.另外,如果利用诸如 GPS、INSAR 和地震等数据资料反演可以得到更精细的断层模型,将有助于进一步检验位错理论结果与 GRACE 观测结果是否符合得更好.

4 结 论

本文利用先进的滤波技术对重力卫星 GRACE 观测数据进行了有效的处理,成功地提取了 2010 智利 M_w 8.8 地震所产生的重力变化信号.通过与位错理论计算结果的比较,证明了观测结果与理论结果

具有较好的一致性. 这是继 GRACE 检测出 2004 苏门答腊 M 9.3 地震重力变化^[2]后的又一个卫星观测地震的例证, 表明 GRACE 具有检测出 $M < 9$ 地震量级的能力, 为利用 GRACE 研究地震以及其更广泛的应用提供了可靠的依据, 对重力卫星探测地震具有重要意义. 同时也进一步验证了 Sun 等^[8,9] 大久保关于 GRACE 检测同震重力变化能力的论点. 随着 GRACE 观测数据的累积, 我们可以期待从 GRACE 数据中提取可靠的震后重力变化信号, 为研究震源机制, 解释 GPS、地表面重力测量数据, 以及反演该地震区域的黏滞性构造等提供可靠的现代大地测量学证据.

在本文修改期间, Han 等 (2010)^[14] 和 Heki, Matsuo (2010)^[15] 分别对该问题进行了研究, 他们利用 GRACE 探测到了智利地震同震重力变化 ($5 \mu\text{Gal}$ 量级). Han 等 (2010)^[14] 比对了智利地震前后各两周的 GRACE 数据, 与本文采用的数据长度有很大差异, 而且分辨率不同, 前者采用的滤波半径是 500 km, 本文则为 300 km; Heki, Matsuo (2010)^[15] 利用的是 GRACE 2006.5~2010.5 时间段的 L2 数据和 300 km Fan 滤波方法, 本文的数据段则是 2003.1~2010.6, 且得到的 GRACE 同震重力变化较 Heki, Matsuo (2010)^[15] 给出的结果更完美. 这三篇研究使用了不同时段的数据和滤波半径, 但都证明了 GRACE 能够检测出 2010 智利 M_w 8.8 地震的同震重力变化信号.

致 谢 与 Caroline de Linage 博士和罗仲良博士的讨论为本文提供了有益的帮助, 同时两名匿名审稿者也提出了宝贵意见, 在此一并致谢!

参考文献 (References)

- [1] Farias M, Vargas G, Tassara A, et al. Land-level changes produced by the M_w 8.8 2010 Chilean earthquake. *Science*, 2010, **329**(5994): 916, DOI: 10.1126/science.1192094
- [2] 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): 658~662
- [3] 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
- [4] Ogawa R, Heki K. Slow postseismic recovery of geoid depression formed by the 2004 Sumatra-Andaman Earthquake by mantle water diffusion. *Geophys. Res. Lett.*, 2007, **34**: L06313, DOI: 10.1029/2007GL029340
- [5] 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
- [6] De Linage C, Rivera L, Hinderer J, et al. Separation of coseismic and postseismic gravity changes for the 2004 Sumatra-Andaman earthquake from 4.6 yr of GRACE observations and modelling of the coseismic change by normal-modes summation. *Geophys. J. Int.*, 2009, **176**(3):695~714
- [7] Gross R S, Chao B F. The gravitational signature of earthquakes. In: Sederis M G ed. Gravity, Geoid, and Geodynamics 2000. IAG International Symposium vol. 123, New York: Springer-Verlag, 2001. 205~210
- [8] Sun W, Okubo S. Coseismic deformations detectable by satellite gravity missions: a case study of Alaska (1964, 2002) and Hokkaido (2003) earthquakes in the spectral domain. *J. Geophys. Res.*, 2004, **109**: B04405, DOI: 10.1029/2003JB002554
- [9] Sun W, Okubo S. Truncated co-seismic geoid and gravity changes in the domain of spherical harmonic degree. *Earth Planets Space*, 2004, **56**(9):881~892
- [10] Bettadpur S. Gravity recovery and climate experiment Level-2 gravity field product user handbook. Rep. GRACE, 327~734. Austin, Tex: Cent. for Space Res., 2007
- [11] Swenson S, Wahr J. Post-processing removal of correlated errors in GRACE data. *Geophys. Res. Lett.*, 2006, **33**: L08402, DOI: 10.1029/2005GL025285
- [12] Sun W, Okubo S. Surface potential and gravity changes due to internal dislocations in a spherical Earth, I. Theory for a point dislocation. *Geophys. J. Int.*, 1993, **114**(3):569~592
- [13] Sun W, Okubo S. Surface potential and gravity changes due to internal dislocations in a spherical Earth, II. Application to a finite fault. *Geophys. J. Int.*, 1998, **132**(1):79~88
- [14] Han S C, Sauber J, Luthcke S. Regional gravity decrease after the 2010 Maule (Chile) earthquake indicates large-scale mass redistribution. *Geophys. Res. Lett.*, 2010, **37**: L23307, DOI: 10.1029/2010GL045449
- [15] Heki K, Matsuo K. Coseismic gravity changes of the 2010 earthquake in central Chile from satellite gravimetry. *Geophys. Res. Lett.*, 2010, **37**: L24306, DOI: 10.1029/2010GL045335