

南极威德尔海电离层异常的综合观测及分析

王泽民¹ 车国伟^{1,2} 安家春¹

1 武汉大学中国南极测绘研究中心, 湖北 武汉, 430079

2 天津测绘院, 天津, 300381

摘要: 威德尔海异常是西南极沿海地区在夏季出现的电离层异常现象。本文用西南极地区的 GPS 跟踪站数据和测高卫星 Jason-2 数据, 分别提取了陆地和海洋地区大范围的电离层 TEC 参数。GPS 反演结果的优势是获取测站上空高精度的 TEC 时间序列, 测高反演的结果整体与 GPS 的结果精度相当, 虽然测高的时间分辨率较低, 但其优势是获取海洋广大区域的 TEC 值。两种观测手段的研究区域互补, 可以充分观测威德尔海异常在西南极的变化特征, 从空间上来看, 威德尔海异常出现在以别林斯高晋海为中心的广大区域, 而威德尔海异常也是覆盖了西南极的别林斯高晋海、威德尔海以及可达 80°S 的西南极陆地区域。从时间上来看, 出现时段在每年的 10 月底到次年 3 月初, 夜晚电子密度增加, 白天电子密度降低, 随着太阳活动的增强, 其异常程度也变大。

关键词: 威德尔海异常; 电离层; GPS; 卫星测高; TEC

中图法分类号: P228.41

文献标志码: A

威德尔海异常(Weddell sea anomaly, WSA)亦称为中纬夏季夜晚异常(mid-latitude summer night anomaly, MSNA), 主要表现为夜晚电子密度增强, 使得每日的电子密度峰值出现在子夜前后。最早是在西南极的南极半岛和威德尔海发现存在 f_oF_2 异常现象, 夏季时, f_oF_2 的最高值出现在 LT 22~4 h, 最低值出现在 LT 12~18 h。其余季节 f_oF_2 变化正常, 在夏季的交替时段, f_oF_2 的正常和异常在数天内迅速变化。早期的学者利用电离层垂测仪^[1]、甚低频多普勒仪器(very low frequency Doppler)^[2]、NNSS^[3]等手段研究了南极半岛区域的威德尔海异常。随着卫星手段的普及, 有学者用 TOPEX 测高卫星^[4-5]、COSMIC^[6-10]将研究范围大大增加, 其研究结果表明, 威德尔海异常与南半球的太平洋区域有密切联系。进而有学者用 SUPIM 模型^[11]、SAMI2 模型^[12]、TIME3D-IGGCAS 模型^[13]等对威德尔海异常进行仿真, 结果表明, 其与中性风的周日变化密切相关。

顾及 GPS 反演结果的优势是获取测站上空高精度的 TEC(total electron content)时间序列, 虽然测高的时间分辨率较低, 但其优势是能获取

海洋广大区域的 TEC 值^[14]。本文在陆地区域用西南极和南美洲的地基 GPS, 可以提供大范围、高精度、全天时的 TEC 结果, 在海洋区域用测高卫星 Jason-2 提供的 TEC 结果, 综合海陆数据, 进行西南极地区的威德尔海异常在不同时空尺度下的详细分析。

1 数据和方法

本文使用了西南极地区的 GPS 跟踪站数据和 Jason-2 测高数据, 其中约 30 多个 GPS 常年跟踪站, 分布在西南极和南美南端, 所选站点尽量覆盖研究区域, 也就是别林斯高晋海和威德尔海。GRW1 站为武汉大学中国南极测绘研究中心(Chinese Antarctic Center of Surveying and Mapping, CACSM)在乔治王岛建立的 GPS 连续跟踪站, 于 2008 年底建成; OHI2、RIO2、VESL、COYQ、PARC、SANT、VALP、ANTC、CONT、LPGS 等为 IGS(international GNSS service)跟踪站; BENN、CAPF、CRDI、DUPT、FONP、HAAG、HOWN、HUGO、KHLR、LTHW、MCAR、PATN、PECE、RAMG、ROBI、SDLY、

收稿日期: 2015-05-04

项目来源: 国家自然科学基金资助项目(41174029, 41204028); 南北极环境综合考察与评估专项基金资助项目(CHINARE2015-02-02); 中央高校基本科研业务费专项基金资助项目(2042014kf0266)。

第一作者: 王泽民, 教授, 博士, 主要从事极区测绘遥感研究。E-mail: zmwang@whu.edu.cn

SUGG、UTHW、VNAD、WAIT、WHTM、WILN 等为 POLENET (the polar earth observing network) 中的 GPS 跟踪站。海洋测高卫星 Jason-2 于 2008-06 发射升空, 轨道高度 1 336 km, 配有 Poseidon-3 双频测高仪 (Ku 波段和 C 波段), 能够获得高精度海面高, 也能够获得海面上空的 TEC 值。

图 1 显示在一个 Cycle (约 10 d) 内 Jason-2 卫星的星下点分布和 GPS 测站的分布。可以看出, 测高卫星较好地覆盖了海洋区域 (图中点线), 却无法包括陆地区域, 而 GPS 测站正好相反, 在陆地区域覆盖较好 (图中三角形), 因此, 两种数据的综合使用有助于研究西南极区域的威德尔海异常的特征。

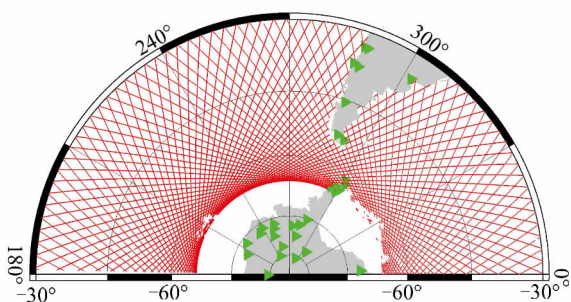


图 1 Jason-2 星下点和 GPS 测站在西南极的分布
Fig. 1 Distribution of Sub-satellite Point of Jason-2 and Ground-Based GPS Stations in West Antarctic

处理 GPS 数据时, 首先进行预处理, 考虑到极区电离层变化迅速, 要剔除伪距值的粗差和相位值的周跳。然后利用 GPS 双频观测值组成无几何观测组合, 利用载波相位平滑伪距的方法获得高精度 TEC, 既解决了伪距观测值噪声较大的问题, 也避免了相位观测值要确定整周模糊度的问题。获得站星间的 STEC (slant TEC) 后, 利用 SLM (single layer mapping) 投影函数将其转化到单层模型 IPP (ionospheric pierce point) 处的 VTEC (vertical TEC)。考虑极区 F_2 层的峰值高度, 将单层高度设为 300 km。卫星位置采用 IGS 公布的精密星历。硬件延迟通过和模型参数同时求解来剔除, 采用 2 h 的球谐模型和全天固定值的接收机硬件延迟和卫星硬件延迟, 并引入卫星硬件延迟之和为 0 作为约束条件, 共同建立法方程, 然后用最小二乘求解。

测高数据使用 DGFI (German geodetic research institute) 基于 Jason-2 发布的 VTEC 产品^[15]。因为卫星雷达高度是直接测量轨道到海面的垂直距离, 所以 Jason-2 可以直接获取星下

点的 VTEC。对 DGFI 发布的 VTEC 数据, 首先要做数据预处理, 对每轨的数据进行滑动平均, 偏差超限的实测值视为粗差, 剔除并修正。然后对多期的轨道进行平均值拟合, 获得所需时段内大范围的 TEC 分布图。

2 GPS 反演的区域电离层分布

电离层活动与太阳活动密切相关, 顾及本文所选的 GPS 和测高数据时段, 图 2 显示了相应时段内太阳 $F_{10.7}$ 指数的变化, 在经历了 2009、2010 年的太阳活动低峰年后, 从 2011 年开始, 太阳活动逐渐增强, 虽然 2012、2013 年的太阳活动规模与以往的高峰年相比较低, 但与太阳活动低峰年相比, 依然表现出显著的阳光活动特征。

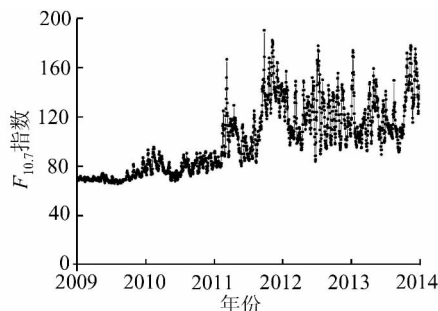


图 2 2009~2014 年的太阳 $F_{10.7}$ 指数变化图
Fig. 2 Solar $F_{10.7}$ Index Change During 2009-2014

图 3 显示了长城站 ($62^{\circ}12'59''S$, $301^{\circ}02'16''E$) GPS 提取的每日 TEC 峰值时刻的时序图, 计算了 2009 年到 2013 年共计 5 a 的 GPS 数据, 具体算法见 § 1。选择长城站作为重点研究对象, 是因为根据以往的威德尔海异常分布范围, 长城站是距离这一异常区域较为接近的 GPS 跟踪站。

如图 3 所示, 在南半球冬季期间, 每日 TEC 峰值时刻主要出现在 LT 12 h 左右, 在春末夏初和夏末秋处, TEC 峰值主要出现在 LT 20 h 左右, 而到盛夏时节, TEC 峰值又在 LT 5 h 左右。而且, 随着太阳活动的增强, 如图 2 所示, 在 2012 年和 2013 年, 甚至在春末夏初和夏末秋初, TEC 峰值也是以 LT 5 h 左右为主。随后在夏秋交替时, 每日 TEC 峰值重新向正午方向回移, 到了秋季期间, 每日 TEC 峰值已完全出现在地方时正午。因此, 本文将重点分析 LT 5 h、12 h、20 h 的 TEC 时间序列, 如图 4 所示。

如图 4 所示, 与图 3 类似, 在冬季时, LT 12 h 的 TEC 值最大, 在春末夏初和夏末秋初, LT 12 h 的 TEC 值开始明显低于 LT 20 h 和 LT 5 h 的 TEC 值。从 2009~2014 年的 TEC 变化趋势来

看,2009 和 2010 年的 TEC 数值相对较低,随着太阳 $F_{10.7}$ 指数在 2011 年年末开始急剧攀升,TEC 的变化也明显更加剧烈,2012~2013 年与 2009~2010 年相比,白天时的 TEC 数值达到 2~3 倍,夜晚时也有 1~2 倍。在每年的 10 月到次年的 2 月期间,正午时的 TEC 值均低于 LT 20 h 和 LT 5 h。

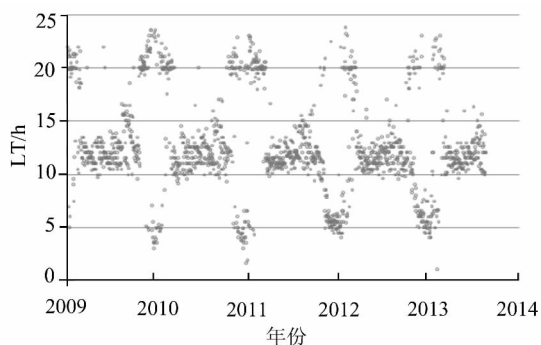


图 3 长城站每日 TEC 峰值地方时序列图

Fig. 3 Daily TEC Peak Time in Great Wall Station

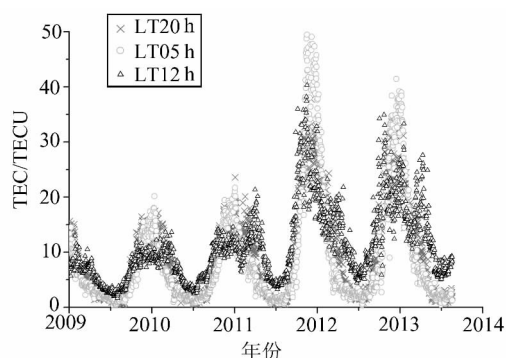


图 4 长城站在地方时 5、12、20 时刻的 TEC 值序列图

Fig. 4 TEC at 5 h, 12 h, 20 h LT in Great Wall Station

图 5 显示了 2012-12-08~17 的西南极地区的 TEC 平均周日变化图,范围是 $60^{\circ}\text{S}\sim 90^{\circ}\text{S}$, $180^{\circ}\text{E}\sim 360^{\circ}\text{E}$ 。每幅子图中,从上到下的 3 个数字分别表示的是 360°E 、 270°E 、 180°E 处的地方时,结合地方时,可以判断威德尔海异常的范围和幅度。从图 5 可以看出,在威德尔海异常的分布范围上,威德尔海异常并不局限在威德尔海区域,而是在威德尔海和别林斯高晋海区域普遍存在,这与以前学者的研究成果一致^[5-6,10]。大量地基 GPS 资料的优势在于提供了陆地区域高精度的 TEC 值,从图 5 中可以清晰地看出威德尔海异常可达 80°S 的西南极陆地区域。但如图 1 所示,由于 GPS 测站集中在南极大陆区域,其 IPP 最远只是覆盖了近岸的海域,所以图 5 的范围只是从 $60^{\circ}\text{S}\sim 90^{\circ}\text{S}$,若再向北扩展,也只是根据小范围的实测值外推,其精度难以保证。

3 卫星测高反演的区域电离层分布

首先比较了 GPS 反演的 TEC 和 Jason-2 反演的 TEC 的差异,以 2013 年 1 月 3 日 10:28:43.968 到 11:04:18.912 为时间段,如图 6 所示,测高卫星反演结果和 GPS 反演结果整体趋势符合较好,在南极半岛附近两者相差较小。测高反演结果在 1500 s 附近明显较低,这是中纬谷所在区域,但 GPS 结果由于缺乏数据未能探测出。在大西洋南部,两者相差可达 5 TECU 以上,且 GPS 的反演结果在最西边和最东边变化平缓,因为缺乏数据为外推结果,说明在 GPS 数据缺乏的情况下,反演到 30°S 已经意义不大,所以 § 2 中 GPS 反演的结果只给出到 60°S 。根据过往测高卫星的反演结果^[5],虽然测高卫星轨道高度只有 1300 多公里,其反演的 TEC 值不包括等离子体层内的电子含量,但与 GIM、IRI 等相比,测高卫星的反演结果反而要高出约 3 TECU。不过整体上来说,几种观测手段的精度基本相当,测高卫星的精度可以满足研究需要。

考虑到 Jason-2 测高卫星的重复周期和星下点轨迹,下面选择了 Cycle 从 159 到 170 的测高数据,即 2012-10-25~2013-02-21,按每 2 h 为间隔划分一天内的地方时,绘制了 12 幅子图,如图 7 所示。虽然跨度近四个月,但均在威德尔海异常的时段内,可以反映出大尺度的威德尔海异常。图 7 中的 12 幅子图范围是 $30^{\circ}\text{S}\sim 90^{\circ}\text{S}$, $180^{\circ}\text{E}\sim 360^{\circ}\text{E}$,测高卫星的覆盖范围是 $30^{\circ}\text{S}\sim 66^{\circ}\text{S}$, $180^{\circ}\text{E}\sim 360^{\circ}\text{E}$ 所在的海洋地区,其中在 $60^{\circ}\text{S}\sim 66^{\circ}\text{S}$, $300^{\circ}\text{E}\sim 360^{\circ}\text{E}$ 区域由于海冰较多(根据美国雪冰数据中心 NSIDC 发布的结果),几乎没有有效的 VTEC 反演结果。与图 5 相比,经度范围扩大了。每幅子图中,从上到下的 3 个数字分别表示的是 360°E 、 270°E 、 180°E 处的地方时。从图 7 中可以看出,在 $240^{\circ}\text{E}\sim 300^{\circ}\text{E}$, $50^{\circ}\text{S}\sim 66^{\circ}\text{S}$ 的区域,TEC 峰值明显出现在 LT 5 h 左右。一方面,这与长城站的变化一致,互相验证了反演的精度;另一方面,这一区域也是威德尔海异常的核心区域。在大范围来看,在 $180^{\circ}\text{E}\sim 330^{\circ}\text{E}$, $40^{\circ}\text{S}\sim 66^{\circ}\text{S}$ 区域内,虽然出现 TEC 峰值的时间并不是严格在子夜时段,但也不是在正午前后,说明均或多或少存在威德尔海异常。而在 0°E 区域,TEC 峰值出现在 LT 11~15 h 左右,这些区域已经是威德尔海异常的边缘区域。

为了进一步揭示 TEC 峰值与地方时的关系,

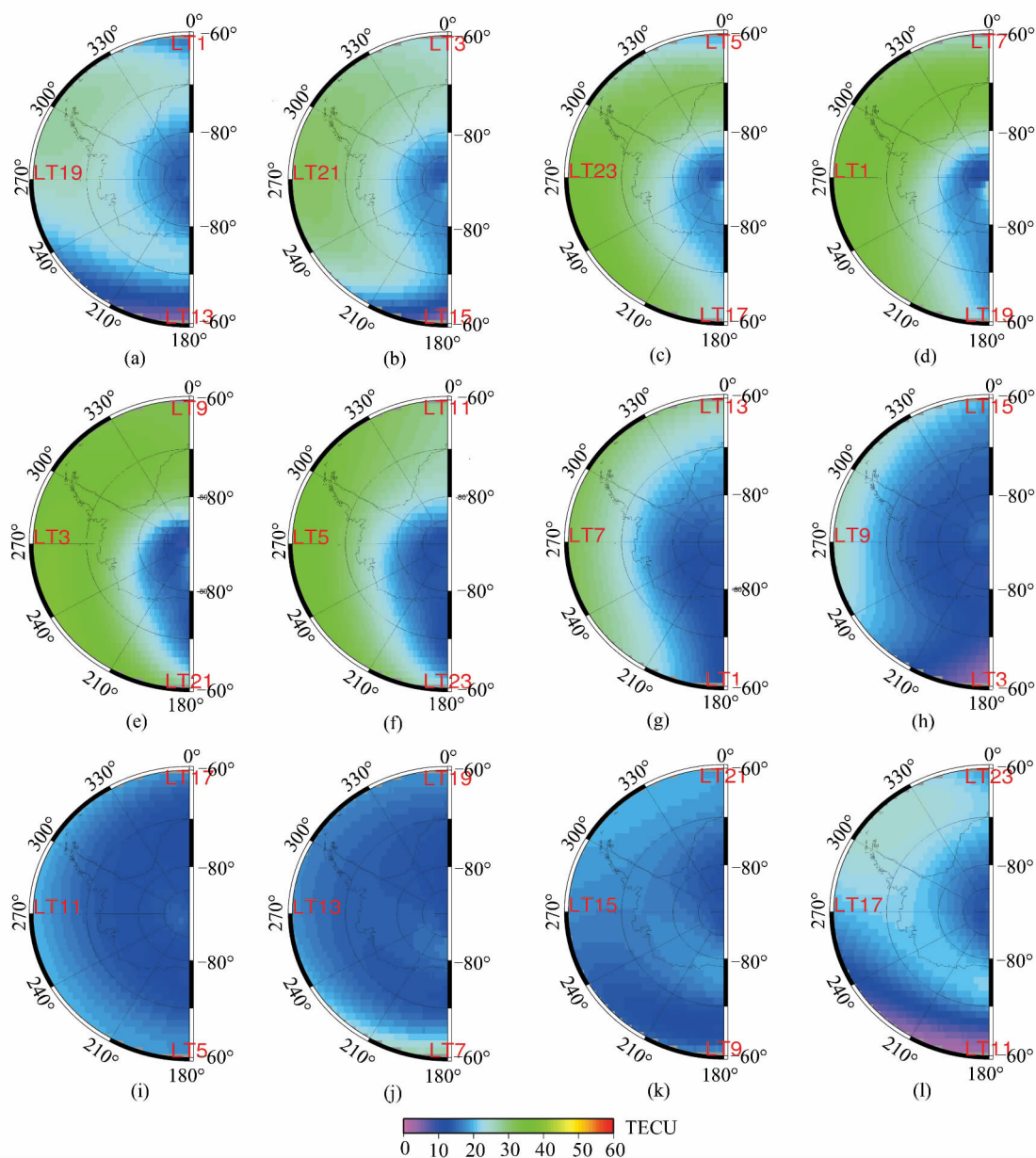


图5 2012-12-08~17 的西南极地区的 TEC 平均周日变化图

Fig. 5 Average Daily TEC in West Antarctic on Dec. 08-17, 2012

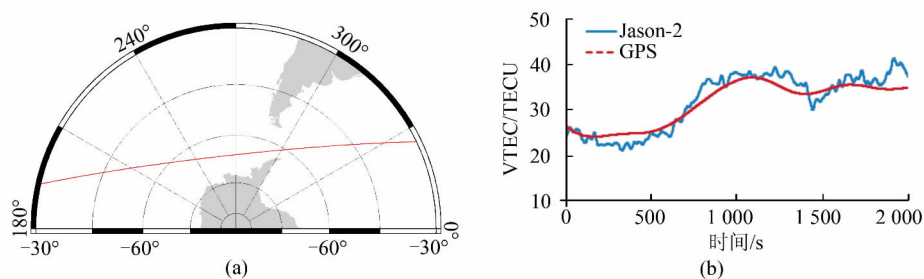


图6 Jason-2 轨迹和两种手段反演的 TEC 比较

Fig. 6 Track of Jason-2 and Comparison of TEC Derived from Two Methods

下面以不同经度区域来进行比较。首先将整个区域沿经线和纬线划分为若干格网,顾及图7中显示的威德尔海异常范围和测高卫星可用区域范围,以及极区经线收敛的特性,确定经线以 10° 为

间隔,纬线以 6° 为间隔。然后重点选择了 210°E 、 270°E 、 330°E 这3条经度带绘制不同纬度的VTEC的周日变化,如图8所示。从图8(a)中可以看出,南半球处于冬季,不仅TEC值偏低,而且

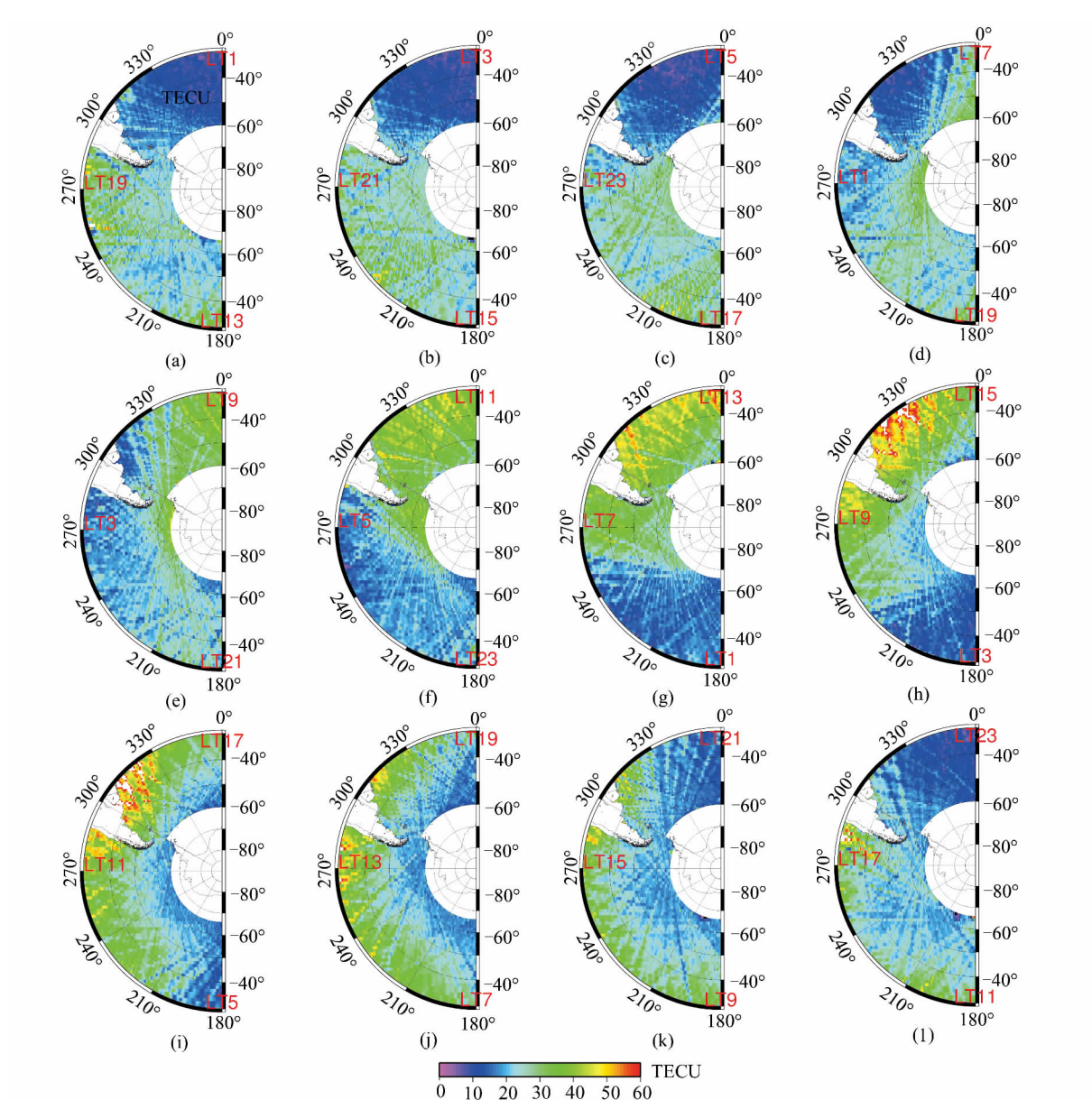


Fig. 7 Sub-Satellite Daily TEC of Jason-2 on Oct. 25, 2012-Feb. 21, 2013

周日变化不显著。而图 8(c) 的周日变化却非常明显,这主要是由于南美南部和南极半岛区域的地理纬度较高,但地磁纬度较低,使得这一区域的 TEC 值偏高,而且周日变化显著。图 8(b) 显示

了典型的威德尔海异常特征,一般认为每日 TEC 峰值出现在 LT 12~16 h,但从图 8(b)中可以看出,在 63°S 和 57°S 区域,每日 TEC 峰值均出现在子夜,而在 51°S、45°S、39°S 区域,每日 TEC 峰

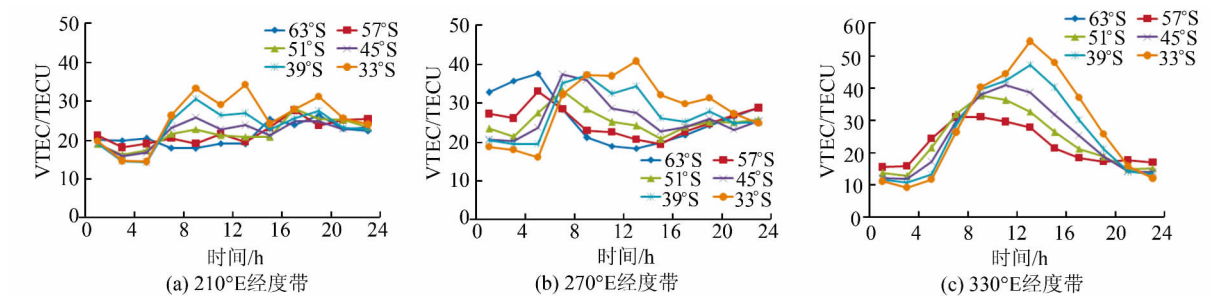


Fig. 8 Daily TEC in Different Latitudes Along the 210°E,270°E,330°E

值出现在凌晨,直到33°S,每日TEC峰值才出现在正午。而图8(a)和图8(c)中,在高纬区域,也可以观察到每日TEC峰值偏离了LT 12~16 h,结合图7,说明威德尔海异常出现在西南极的广大区域。

4 成因讨论

关于威德尔海异常的成因,包括中性风的变化、 $[O]/[N_2]$ 的比率的变化、与高纬对流相关的背向太阳的风的作用、等离子体向下的扩散等。从模型仿真的结果来看^[11-13],中性风对威德尔海异常的影响很大。南磁极位于东南极的法国迪蒙迪维尔站附近,因此,西南极海洋地区虽然地理纬度很高,但地磁纬度却较低,磁倾角在50°~60°S,磁偏角也较大,中性风的作用很强。根据Rishbeth^[16]给出的中性风效应关系式: $W_{\text{eff}} = (W_m \cos D + W_z \sin D) \cos I \sin I$,其中 W_{eff} 表示中性风垂直分量; W_m 和 W_z 表示经向和纬向的中性风分量,以朝向赤道和朝向东为正值; D 和 I 是磁偏角和磁倾角。西南极海洋区域的磁偏角较大^[17],夜晚期间,纬向风使得等离子体向高处抬升,磁倾角接近于45°,使得 $\cos I \sin I$ 也很大。每到夏季,在夜间,朝向赤道中性风仍然使等离子体向高处抬升,在持续的电子生成作用下, F 层的高度不断增加。而在白天,朝向极区的中性风驱动电子沿着磁力线向低处运动,加快了电子和离子的复合。而在东南极海洋地区,磁偏角为负,磁倾角过大,使得中性风很难输送等离子体。

5 结语

从以上分析可以看出,GPS与测高卫星Jason-2的联合观测可以覆盖陆地到海洋的广大区域,而威德尔海异常也是覆盖了西南极的别林斯高晋海、威德尔海以及可达80°S的西南极陆地区域。GPS反演结果可以获取测站上空高精度的TEC时间序列,对于分析威德尔海异常的出现时间和变化程序进行精确描述。测高反演的结果与GPS的结果精度相当,虽然测高的时间分辨率较低,但适用于大尺度的分析,可以观察到威德尔海异常的变化范围。综合来看,威德尔海异常出现在以别林斯高晋海为中心的广大区域,出现时段在每年的10月底到次年3月初,夜晚电子密度增加,白天电子密度降低,随着太阳活动的增强,其异常程度也变大。

致谢:感谢IGS和POLENET提供的GPS

观测数据,以及DGFI提供的Jason-2测高数据。

参考文献

- [1] Jarvis M J, Jenkins B, Rogers G A. Southern Hemisphere Observations of a Long-Term Decrease in F Region Altitude and Thermospheric Wind Providing Possible Evidence for Global Thermospheric Cooling [J]. *J Geophys Res*, 1998, 103 (A9): 20 774-20 787
- [2] Clilverd M A, Smith A J, Thomson N R. The Annual Variation in Quiet Time Plasmaspheric Electron Density, Determined from Whistler Mode Group Delays [J]. *Planetary Space Science*, 1991, 39:1 059-1 067
- [3] Heaton J A T, Jones G O L, Kersley L. Toward Ionospheric Tomography in Antarctica: First Steps and Comparison with Dynasonde Observations [J]. *Antarctic Science*, 1996, 8 (3):297-302
- [4] Horvath I, Essex E A. The Weddell Sea Anomaly Observed with the Topex Satellite Data [J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2003, 65:693-706
- [5] Horvath I. A Total Electron Content Space Weather Study of the Nighttime Weddell Sea Anomaly of 1996/1997 Southern Summer with Topex/Poseidon Radar Altimetry [J]. *J Geophys Res*, 2006, 111: A12317, doi:10.1029/2006JA011679
- [6] Burns A G, Zeng Z, Wang W, et al. Behavior of the F_2 Peak Ionosphere over the South Pacific at Dusk During Quiet Summer Condition from COSMIC Data [J]. *J Geophys Res*, 2008, 113: A12305, doi: 10.1029/2008JA013308
- [7] He M, Liu L, Wan W, et al. A Study of the Weddell Sea Anomaly Observed by FORMOSAT-3/COSMIC [J]. *J Geophys Res*, 2009, 114: A12309, doi: 10.1029/2009JA014175
- [8] Lin C H, Liu J Y, Cheng C Z, et al. Three-dimensional Ionospheric Electron Density Structure of the Weddell Sea Anomaly [J]. *J Geophys Res*, 2009, 114: A02312, doi: 10.1029/2008JA013455
- [9] Lin C H, Liu C H, Liu J Y, et al. Mid-latitude Summer Nighttime Anomaly of the Ionospheric Electron Density Observed by FORMOSAT-3/COSMIC [J]. *J Geophys Res*, 2010, 115: A03308, doi: 10.1029/2009JA014084
- [10] Liu J Y, Chang F Y, Oyama K I, et al. Topside Ionospheric Electron Temperature and Density Along the Weddell Sea Latitude [J]. *J Geophys Res Space Physics*, 2014, 119, doi: 10.1002/2014JA020227
- [11] Thampi S V, Balan N, Lin C, et al. Mid-latitude Summer Nighttime Anomaly (MSNA)—Observa-

- tions and Model Simulations [J]. *Ann Geophys*, 2011, 29: 157-165
- [12] Chen C H, Huba J D, Saito A, et al. Theoretical Study of the Ionospheric Weddell Sea Anomaly Using SAMI2 [J]. *J Geophys Res*, 2011, 116: A04305, doi: 10.1029/2010JA015573
- [13] Ren Zhipeng, Wan Weixing, Liu Libo, et al. Simulated Mid-latitude Summer Nighttime Anomaly in Realistic Geomagnetic Fields [J]. *J Geophys Res*, 2012, 117: A03323, doi: 10.1029/2011JA017010
- [14] Jin Taoyong, Hu Minzhang, Jiang Tao, et al. Cross-Calibration and Errors Analysis of Ionospheric Correction in Satellite Altimetry[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2012, 37(6): 658-661(金涛勇, 胡敏章, 蒋涛, 等. 卫星测高资料的电离层延迟改正交叉检验及误差分析[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2012, 37(6): 658-661)
- [15] Dettmering D, Schmidt M, Heinkelmann R, et al. Combination of Different Space-Geodetic Observations for Regional Ionosphere Modeling [J]. *Journal of Geodesy*, 2011, 85(12): 989-998
- [16] Rishbeth H. How the Thermospheric Circulation Affects the Ionospheric F_2 -layer [J]. *J Atmos Sol Terr Phys*, 1998, 60: 1 385-1 402

Comprehensive Observation and Analysis of Weddell Sea Anomaly in Antarctica

WANG Zemin¹ CHE Guowei^{1,2} AN Jiachun¹

1 Chinese Antarctic Center of Surveying and Mapping, Wuhan University, Wuhan 430079, China

2 Tianjin Institute of Surveying and Mapping, Tianjin 300381, China

Abstract: Weddell sea anomaly, appeared in west Antarctica, is an ionospheric anomaly. In this paper ground-based, GPS data and altimetry satellite Jason-2 data in west Antarctica are used to extract TEC in continental and oceanic areas respectively. The advantages of ground-based GPS are to obtain TEC time series over the station. TEC results of satellite altimetry and ground-based GPS are at the same precision level. Although the time resolution of satellite altimetry is lower, the advantages of satellite altimetry are to be observed in ocean areas. The two observations are complementary, which is valuable to depict the comprehensive characteristics of WSA in west Antarctic together. In view of space, WSA appeared mainly in Bellingshausen Sea, and also covered Bellingshausen sea and the Weddell sea, as well as up to 80° S of the west Antarctic continent. In view of time, the period of the appearance is from Oct. to Mar. next year, with the characteristics of low electron density in daytime but high electron density in nighttime, and the abnormal degree become larger in high solar activity.

Key words: Weddell sea anomaly; ionosphere; GPS; satellite altimetry; TEC

First author: WANG Zemin, professor, PhD, specializes in polar surveying, mapping and remote sensing. E-mail: zmwang@whu.edu.cn

Foundation support: The National Natural Science Foundation of China, Nos. 41174029, 41204028; the Chinese Polar Environment Comprehensive Investigation and Assessment Program, No. CHINARE2015-02-02; the Fundamental Research Funds for the Central Universities, No. 2042014kf0266.