

利用 COSMIC 掩星资料分析南极地区对流层顶变化

屈小川¹ 安家春² 刘根³

1 武汉大学测绘学院,湖北 武汉,430079

2 武汉大学中国南极测绘研究中心,湖北 武汉,430079

3 湖北省电力勘测设计院,湖北 武汉,430040

摘要:利用 2011 年全年的南极地区的 COSMIC 掩星资料,反演了大气温度剖面,进而提取对流层顶参数(温度和高度),定量分析了南极地区对流层顶的时空变化特征。在南极地区,温度递减率对流层顶比最冷点,对流层顶更准确,且掩星反演法与臭氧、无线电探空仪等结果基本一致。南极对流层顶整体表现为位相相反的一波结构,温度变化范围为 200~230 K,高度变化范围为 9~11 km。南极地区对流层顶在冬季和春季“消失”,在夏季和秋季出现逆温层。南极地区对流层顶温度在冬季和春季表现出明显的梯度特征,纬度方向上,极点附近低,四周较高;经度方向上,西南极地区较低。

关键词:无线电掩星; COSMIC; 南极; 对流层顶

中图法分类号:P228.42

文献标志码:A

对流层顶作为对流层和平流层之间的过渡层,是地球上物质和能量交换的重要纽带,在气候变化研究中的作用日益突出^[1]。目前,针对对流层顶的研究更多集中在热带、亚热带地区,由于观测资料匮乏,两极地区的研究相对较少。有学者用欧洲中期天气预报中心(ECMWF)再分析数据、无线电探空仪^[2]、臭氧探空仪^[3]、甚高频雷达^[4]等分析了两极地区的对流层顶特征,上述工作更侧重于具体点位的研究。

无线电掩星探测技术作为一种新型的气象探测手段,具有全球覆盖、高精度、高垂直分辨率、全天候观测、自校准性等优点^[5-6]。COSMIC 是一个包含 6 颗卫星的掩星星座,对全球具有较好的覆盖性,尤其是能覆盖极区内陆、海洋等缺乏观测数据的区域。利用掩星资料,有学者分别从对流层顶定义和特性等方面进行了相关研究^[7-8]。本文收集了 2011 年南极地区的 COSMIC 掩星观测数据,反演南极内陆和海洋区域的对流层顶参数(对流层顶高度和温度),分析了南极地区的对流层顶特征,为南极地区的气象、气候研究提供一些参考。

1 反演方法

无线电掩星探测技术是利用搭载在低轨卫星(LEO)上的接收机接收来自 GNSS 卫星的掩星信号,采集地球大气引起的信号相位变化信息,并利用相应的反演算法解求出大气折射率、温度等参数。大气折射率是由弯曲角剖面经 Abel 积分变换得到^[9]:

$$n(a_0) = \exp\left\{\frac{1}{\pi} \int_{a_0}^{\infty} \frac{\alpha(x) dx}{\sqrt{x^2 - a_0^2}}\right\} \quad (1)$$

式中, a_0 为碰撞高度; α 为弯曲角; n 为大气折射指数; $x=nr$, r 为近地点至曲率中心的距离。由于高层大气的弯曲角受到电离层残余误差、热噪声等误差的影响较大,为避免这些误差通过 Abel 积分累积向下传播,一般需要进行弯曲角统计优化。温度、气压等大气参数是折射率经 Smith-Weintraub 方程、理想气体状态方程和流体静力学平衡方程联合反演得到^[9]:

$$N = k_1 \frac{P}{T} + k_2 \frac{P_w}{T^2}, PV = \frac{m}{M} RT, P(h) = \int_h^{\infty} \rho g dh \quad (2)$$

收稿日期:2013-12-04

项目来源:国家自然科学基金资助项目(41174029,41204028,41231064);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(121001);国家海洋局极地科学重点实验室开放基金资助项目(KP201201);南北极环境综合考察与评估专项资助项目(CHINARE)。

第一作者:屈小川,博士生,研究方向为 GNSS 数据处理及应用。E-mail: qqxxcc@whu.edu.cn

通讯作者:安家春,博士,讲师。E-mail: jcan@whu.edu.cn

式中, N 为大气折射率; k_1 和 k_2 分别为 0.776 K/Pa 和 $3.730 \text{ K}^2/\text{Pa}$; P 和 T 为混合气体的气压 (Pa) 和温度 (K); P_w 为湿空气的气压 (Pa); m 和 V 为混合气体的质量 (kg) 和体积 (m^3); R 为普适气体常数, 等于 $8.314472 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$; M 为混合气体的平均摩尔质量 (kg/mol); g 为重力加速度 (m/s^2); ρ 为气体密度 (kg/m^3)。在由折射率反演温度、气压和水汽参数时, 由于干湿气体模糊问题^[10], 需要从外部引入气象观测数据或模型数据来分离干湿空气。但是, 当大气温度小于 250 K 时, 可忽略湿空气气压 P_w 的影响, 直接反演出干大气的温度、气压等参数。南极地区由于温度极低、气候干燥, 所以在此可以不用考虑湿空气气压 P_w 的影响。

获得温度剖面后, 进而提取对流层顶相关参数。从不同角度出发, 对流层的定义也不相同。有按温度递减率定义的对流层顶 (lapse rate tropopause, LRT)^[4], 1957 年 WMO 给出其定义是: 500 hPa 等压面之上温度递减率小于 $2 \text{ }^\circ\text{C}/\text{km}$

的最低高度, 在此高度向上 2 km 的范围内温度平均不超过 $2 \text{ }^\circ\text{C}/\text{km}$ 。如果任意高度与其上 1 km 所有高度之间的平均温度递减率超过 $3 \text{ }^\circ\text{C}/\text{km}$, 则定义为第二对流层顶。有最冷点对流层顶 (cold point tropopause, CPT), 为垂直温度廓线上温度最低点所对应的高度。还有动力学对流层顶、有臭氧对流层顶^[3]等。无论哪一种对流层顶的定义, 其物理本质都是相同的, 即将对流层顶看作不连续面。本文利用掩星数据反演温度剖面, 主要讨论这两种热力学对流层顶定义方式在南极地区的效果。臭氧和探空仪数据提供的对流层顶参数主要用于和掩星反演结果进行对比分析。

2 结果分析

本文选取了 2011 年南极地区近 6 万次 COSMIC 掩星事件, 空间范围是 $60^\circ\text{S} \sim 90^\circ\text{S}$, $-180^\circ\text{E} \sim 180^\circ\text{E}$, 具体次数见表 1。

表 1 2011 年南极地区每月的 COSMIC 掩星次数

Tab. 1 Occultation Frequency in Antarctica in 2011

	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
掩星次数	3 860	3 687	5 062	5 008	4 344	4 975	5 341	4 986	4 527	3 927	4 629	6 230

利用掩星数据, 按天统计了全南极地区的对流层顶温度和高度变化, 图 1(a) 是按 CPT 定义的对流层顶参数, 图 1(b) 是按 LRT 定义的对流层顶参数。从图 1 中可见, 对流层顶温度的最低点出现在南半球的冬季, 最高点出现在南半球的夏季, 变化范围从 200 K 到 230 K 。这一变化称为位相相反的一波结构^[3]。但是, 对流层顶的高度差别很大, 图 1(b) 中高度的季节变化不明显, 冬季略高, 变化范围从 9 km 到 11 km , 而图 1(a) 中高度在 $6 \sim 11$ 月期间出现明显升高。因此, 需要进一步分析。

选取南极点附近 (限定范围是掩星事件的纬度值大于 88°S) 的 12 次掩星事件, 掩星发生时间分布在 2011 年全年的 12 个月, 具体年积日分别是 18、45、75、104、137、166、200、216、270、292、311、346。相应的温度剖面如图 2 所示。

从图 2 中可以看出, 在对流层 (10 km 以下) 中, 各月份温度均随高度升高而逐渐降低, 其变化规律一致。在约 10 km 的对流层顶处, $1 \sim 5$ 月和 12 月, 温度值达到极小值; 而在 $6 \sim 11$ 月, 温度值在对流层顶往上仍持续降温, 直到 20 km 以上才开始出现增温。这说明温度的垂直结构在下平流层有显著的季节变化。正是由于下平流层的季节

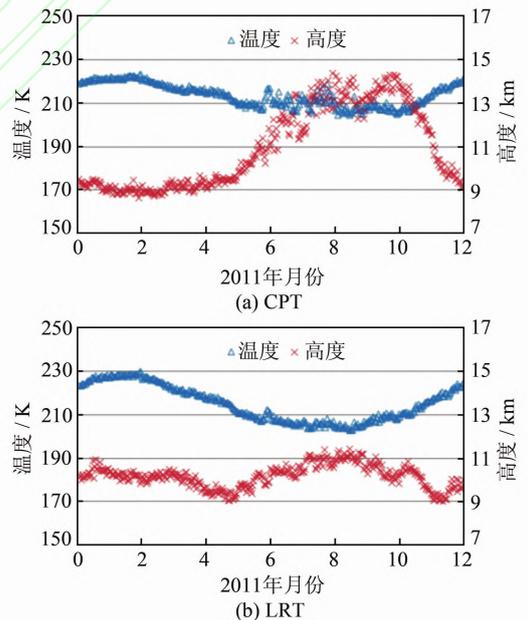


图 1 按 CPT 和 LRT 定义的 2011 年全南极对流层顶的温度和高度变化

Fig. 1 Antarctic Tropopause Temperature and Height in 2011 Defined by CPT and LRT

变化, 使得温度剖面的温度极小值出现在下平流层中, 从而导致按 CPT 定义的对流层顶参数出现偏差, 如图 1(a) 中所示, 对流层顶高度在冬季和

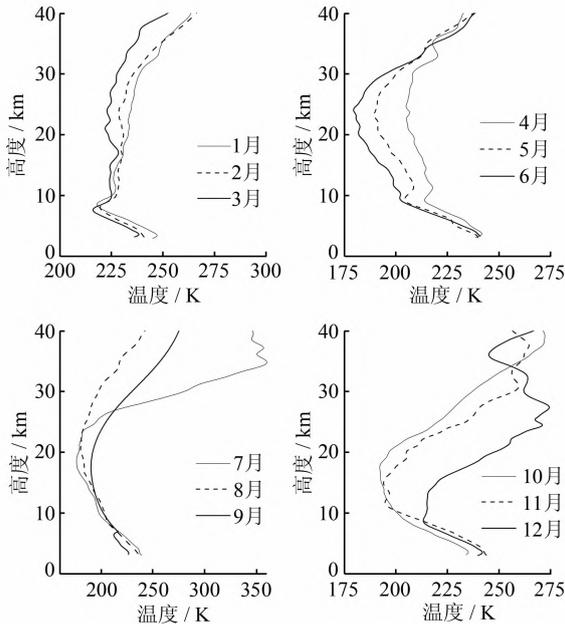


图 2 南极点附近 2011 年 12 个月的温度剖面
Fig. 2 Temperature Profiles Near Antarctic Pole in 2011

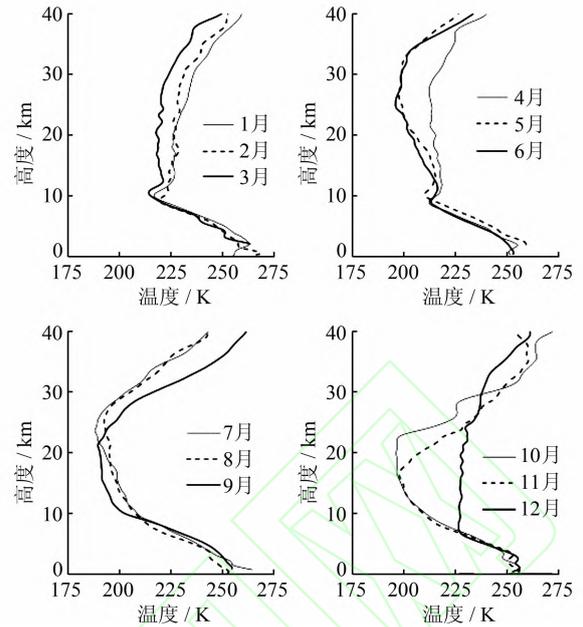


图 3 南极半岛附近 2011 年 12 个月的温度剖面
Fig. 3 Temperature Profiles Near Antarctic Peninsula in 2011

春季显著抬升,不符合真实情况。温度垂直分布在对流层顶没有明显的转折点,这一现象也被称为南极地区的对流层顶“消失”^[11]。在南极地区冬季期间,伴随着极夜等现象,太阳辐射加热很少,对流很弱,因此,缺乏维持常规对流层顶的必要条件。所以,本文后续的分析均是以 LRT 的定义来确定对流层顶参数。另外,南极夏季和秋季(1~5 月)出现了明显的逆温层(tropopause inversion layer, TIL),对流层顶往上 2~3 km 范围内温度迅速增加达 8~10 K。极区对流层顶逆温层的出现与极区夏季水汽含量增加和臭氧变化有相关性^[12],也可能与温带对流层顶过渡层(extra-tropical tropopause transition layer, ExTL)有关联^[13]。

选取南极半岛附近(限定范围是掩星事件的纬度值在 62°S ~ 66°S,经度值在 53°W ~ 61°W)的 12 次掩星事件,掩星发生时间分布在 2011 年全年的 12 个月,具体年积日分别是 19、49、74、110、142、168、197、227、259、292、321、348。相应的温度剖面如图 3 所示。

从图 3 中可以看出,同样是在 6~11 月期间,温度值在对流层顶处微小增温后,往上仍持续降温,直到 20 km 以上才开始出现增温;在 1~5 月期间,对流层顶往上 2~3 km 范围内温度迅速增加 5~7 K。结合图 2 来看,表明了对流层顶“消失”的现象以及对流层顶逆温层的现象在南极地区是大范围出现的。

为了进一步验证和分析对流层顶特征,引入南极半岛的 MARAMBIO 站(64. 263° S, 56. 653° W)的臭氧观测数据和无线电探空仪观测数据进行比较,所选取的时段与掩星反演数据的时段基本一致,具体年积日分别是 19、47、76、110、140、167、197、228、257、291、320、348。需要说明的是,臭氧和无线电探空仪的数据不是每天连续观测的,共收集到该站 2011 年 66 d 的观测数据。用于对比分析的掩星结果和地面站结果的年积日尽可能相差在 2 d 之内。图 4 给出了 MARAMBIO 站的臭氧剖面,图 5 给出了该站无线电探空仪观测的温度剖面。

从图 3~5 中可以看出,三种方法表征的对流层顶的高度和温度基本一致。臭氧对流层顶是根据梯度变化来定义的,探空仪获得的是观测点上空的垂直温度剖面,而掩星反演的温度剖面水平方向跨度达 200 km。顾及对流层顶的时空变化特征相对平稳,可以认为,本文的掩星温度剖面反演是有效的。另外,图 4 中的 10 月份臭氧数值的下降主要是由于南极地区春季的臭氧空洞现象。

图 6 给出了 2011 年全年按月统计的对流层顶温度变化图。空间尺度上划分为 71 个区域,其中,纬度方向从 60°S 到 85°S,每 5°一组,经度方向上从 180°E 到 180°W,每 30°一组,这样分为 70 个区域,还有 85°S 到 90°S 的为 1 个区域。时间尺度上,按月统计所有掩星事件。

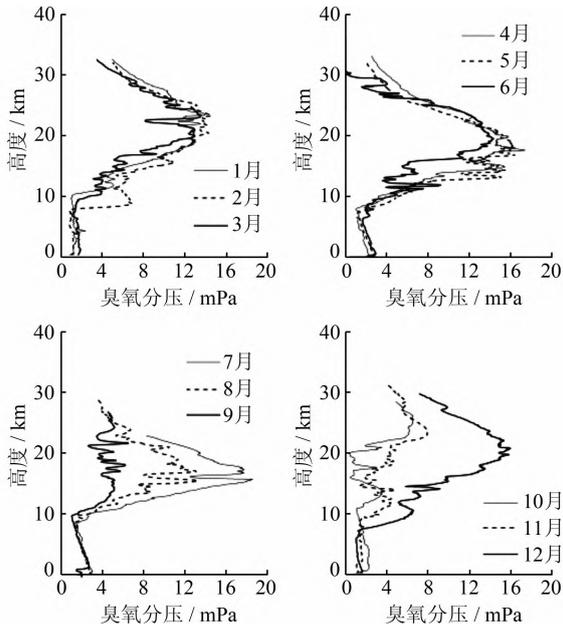


图4 MARAMBIO站2011年12个月的臭氧剖面

Fig. 4 Ozone Profiles at MARAMBIO in 2011

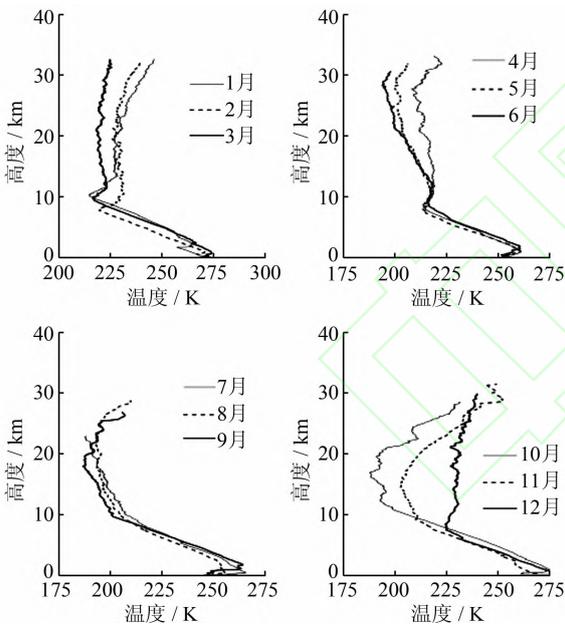


图5 MARAMBIO站2011年12个月的温度剖面

Fig. 5 Temperature Profiles at MARAMBIO in 2011

结合图1、图6可以看出,全南极区域的对流层顶温度都出现位相相反的一波结构,温度的最低点出现在南半球的冬季,最高点出现在南半球的夏季。除了1~3月,其余月份对流层顶温度的分布都呈现出南极点最低、四周逐渐升高的特点。1~3月为南极地区夏季期间,对流层顶活动相对剧烈。其余月份时,对流层顶活动较小,温度分布表现出明显的梯度特征,在冬季和春季表现尤其明显,温度梯度达到极值,这与南极地区冬季期间缺乏太阳辐射相关。经度方向上,在冬季和春季

也出现了梯度,主要是在西经 60° 到东经 60° 之间的西南极地区,对流层顶温度较低,这可能是由于西南极地区陆地较少、海域较广。另外,对流层顶高度的变化相对复杂,这主要是由于南极地区对流层顶高度的确定比较困难。对流层顶温度梯度的变化在极区对流层和平流层耦合中扮演了重要角色,而温度梯度的增大又与平流层极地涡旋增强等现象密切联系^[14]。

3 结论

本文利用2011年全年的南极地区的COSMIC掩星资料,反演了大气温度剖面,进而提取对流层顶参数(温度和高度),定量分析了南极地区对流层顶的时空变化特征,主要得出以下结论。

1) 掩星反演对流层顶的方法中,在南极地区,由于冬季对流层顶消失的现象,LRT比CPT更能真实地反映南极对流层顶情况。

2) 掩星反演的对流层顶,与臭氧对流层顶高度、无线电探空仪对流层顶等基本一致,说明掩星反演算法是有效的。

3) 南极对流层顶整体表现为位相相反的一波结构。温度变化范围为 $200\sim 230\text{ K}$,高度变化范围为 $9\sim 11\text{ km}$ 。

4) 南极对流层顶在冬季和春季“消失”,在夏季和秋季出现逆温层,这些特征是在南极地区大范围出现的。

5) 南极对流层顶温度在冬季和春季表现出明显的梯度。纬度方向上,极点附近低,四周较高;经度方向上,西南极地区较低。

致谢:感谢CDAAC提供的COSMIC掩星数据资料;感谢WOUDC提供的臭氧和无线电探空资料。

参考文献

- [1] Santer B D, Wehner M F, Wigley T M L, et al. Contributions of Anthropogenic and Natural Forcing to Recent Tropopause Height Changes [J]. *Science*, 2003, 301(5 632): 479-483
- [2] Zangl G, Hoinka K P. The Tropopause in the Polar Regions [J]. *Journal of Climate*, 2001, 14: 3 117-3 119
- [3] Bian L G, Lin Z, Zhang D Q, et al. The Vertical Structure and Seasonal Changes of Atmosphere Ozone and Temperature at Zhongshan Station over East Antarctica [J]. *Sci China Earth Sci*, 2011, 41 (12): 1 762-1 770

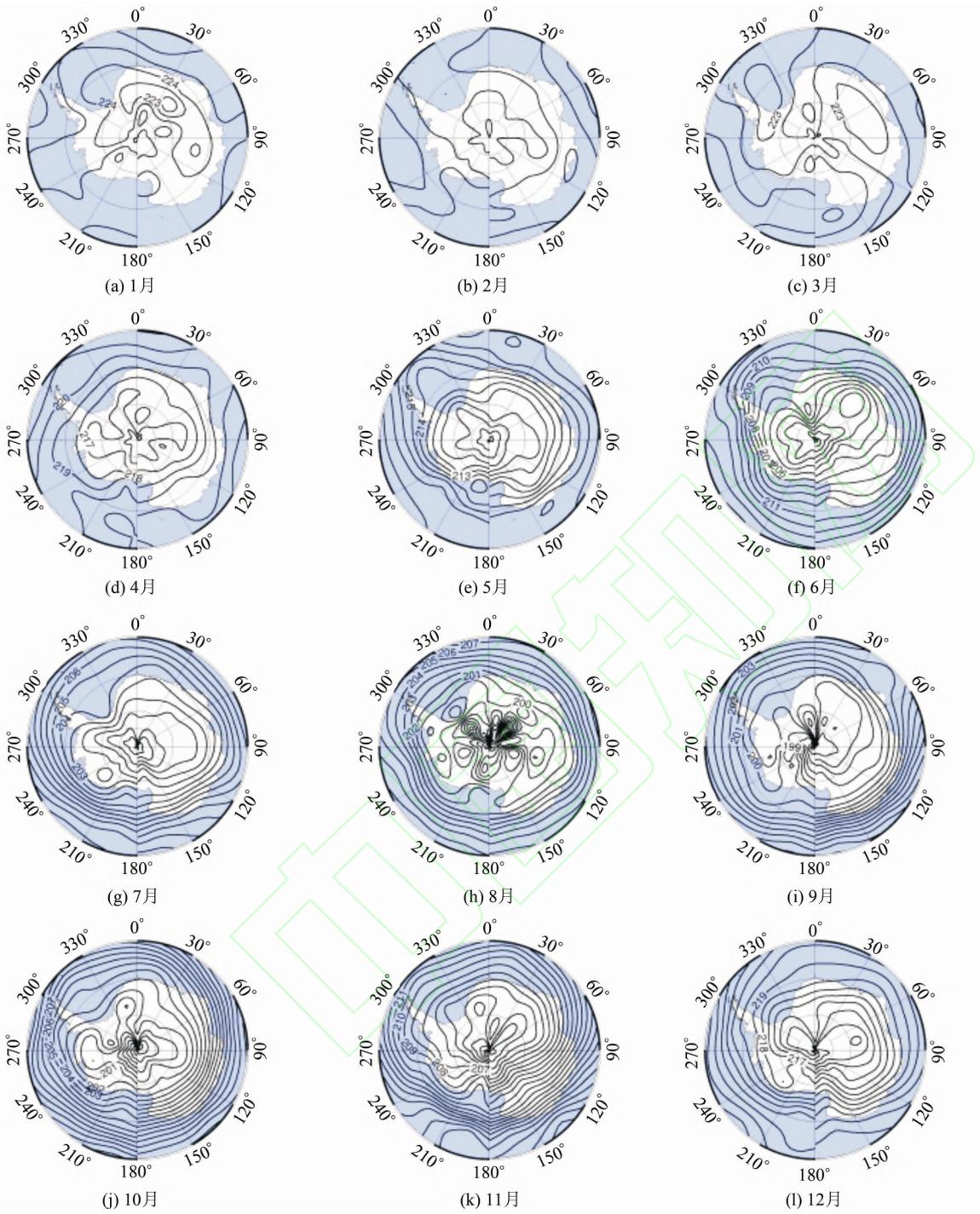


图 6 2011 年各月的南极地区对流层顶温度分布

Fig. 6 Antarctic Tropopause Temperature Distribution in 2011

[4] Alexander S P, Murphy D J, Klekociuk A R. High Resolution VHF Radar Measurements of Tropopause Structure and Variability at Davis, Antarctica (69°S, 78°E) [J]. *Atmos Chem Phys*, 2013, 13: 3 121-3 132

[5] Xu Xiaohua, Zhang Kefei, Wang Haihong. Comparison of Precision of GPS Radio Occultation Profiles in Different Seasons [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2010, 35(6): 639-643(徐晓华, Zhang K F, 汪海洪. 不同季节

GPS 掩星廓线精度的比较研究[J]. *武汉大学学报·信息科学版*, 2010, 35(6): 639-643)

[6] Syndergaard S. Retrieval Analysis and Methodologies in Atmospheric Limb Sounding Using the GNSS Radio Occultation Technique [R]. DMI Scientific Report 99-6, 1999, Danish Meteorological Institute, Copenhagen, Danish

[7] Staten P W, Reichler T. Use of Radio Occultation for Long-term Tropopause Studies: Uncertainties, Biases, and Instabilities [J]. *J Geophys Res*, 2008,

- 113(D7), DOI: 10.1029/2008JD009886
- [8] Zhang X H, Gao P, Xu X H. Variations of the Tropopause Over Different Latitude Bands Observed Using COSMIC Radio Occultation Bending Angles [J]. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 2014, 52(5): 2 339-2 349
- [9] Hajj G A, Kursinski E R, Romans L J, et al. A Technical Description of Atmospheric Sounding by GPS Occultation [J]. *J Atmos Sol-Terr Phys*, 2002, 64(4): 451-469
- [10] Kursinski E R, Hajj G A, Schofield J T, et al. Observing Earth's Atmosphere with Radio Occultation Measurement Using the Global Positioning System [J]. *J Geophys Res*, 1997, 120(D19): 23 429-23 465
- [11] Roscoe H K. Possible Descent Across the "Tropopause" in Antarctic Winter [J]. *Adv Space Res*, 2004, 33(7): 1 048-1 052
- [12] Randel W J, Wu F. The Polar Summer Tropopause Inversion Layer [J]. *J Atmos Sci*, 2010, 67: 2 572-2 581
- [13] Hegglin M I, Boone C D, Manney G L, et al. A Global View of the Extratropical Tropopause Transition Layer from Atmospheric Chemistry Experiment Fourier Transform Spectrometer O₃, H₂O, and CO [J]. *J Geophys Res*, 2009, 114(D7), DOI: 10.1029/2008JD009984
- [14] Limpasuvan V, Hartmann D L, Thompson D W J, et al. Stratosphere-Troposphere Evolution During Polar Vortex Intensification [J]. *J Geophys Res*, 2005, 110(D24), DOI: 10.1029/2005JD006302

Analysis of Antarctic Tropopause with COSMIC Occultation Data

QU Xiaochuan¹ AN Jiachun² LIU Gen³

¹ School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, Wuhan 430079, China

² Chinese Antarctic Center of Surveying and Mapping, Wuhan University, Wuhan 430079, China

³ Hubei Electric Power Survey and Design Institute, Wuhan 430040, China

Abstract: Using COSMIC occultation data in 2011, the atmospheric temperature profiles in Antarctica are inverted, and the tropopause parameters (temperature and altitude) are extracted. The spatial and temporal Antarctic tropopause variations are analyzed quantitatively. In Antarctica, the temperature lapse rate tropopause is more accurate than the coldest point tropopause, and the occultation method is the same as ozonesonde and radiosonde. The Antarctic tropopause shows one wave structure with contrary phase, temperature ranges from 200 K to 230 K, the height from 9 km to 11 km. Antarctic tropopause disappears in winter and spring, and occurs inversion layer in summer and autumn. The tropopause temperature in winter and spring shows significant gradient feature. In latitude direction, the temperature is low near the pole, high around; in longitude direction, the temperature is lower in the West Antarctica.

Key words: radio occultation; COSMIC; Antarctica; tropopause

First author: QU Xiaochuan, PhD candidate, specializes in GNSS data processing and application. E-mail: qqxxcc@whu.edu.cn

Corresponding author: AN Jiachun, PhD, lecturer. E-mail: jcan@whu.edu.cn

Foundation support: The National Natural Science Foundation of China, Nos. 41204028, 41231064, 41174029; the Fundamental Research Funds for the Central Universities, No. 121001; the Open Research Fund of Key Laboratory for Polar Science, SOA, No. KP201201; the Chinese Polar Environment Comprehensive Investigation and Assessment Programs.