

利用 FY-3C 卫星 GNSS 掩星数据 分析中国区域对流层顶参数变化

郭佳宾¹ 金双根^{1,2}

1 南京信息工程大学遥感与测绘工程学院,南京市宁六路 219 号,210044

2 中国科学院上海天文台,上海市南丹路 80 号,200030

摘要: 使用 FY-3C 气象卫星 GNSS 掩星数据反演得到 2017-03-01~2018-02-28 大气温度廓线,并估计对流层顶高度变化;然后利用探空气球数据和 ERA5 模型数据进行验证;最后以 $2^{\circ} \times 2^{\circ}$ 的空间分辨率将中国区域划分为 608 个网格,针对每一个单元格,分别计算对流层顶参数,建立格网模型,分析中国区域对流层顶参数的时空分布特征。结果表明,对流层顶参数随纬度具有明显的分带特征,在经度上变化并不明显,表现为南北区域不对称、东西区域较为对称的现象;对流层顶参数具有明显的季节性变化特征。

关键词: 掩星;对流层顶高度;FY-3C;精度分析;对流层顶温度

中图分类号: P228

文献标识码: A

对流层是地球大气层中密度最大的一层,占据了整个大气层 75% 的质量。大气层中 90% 的水汽集中在对流层,且对流频繁,因此,众多天气现象都发生在对流层中^[1]。对流层顶是平流层和对流层的过渡区域,在这个区域对流层与平流层频繁交换气团、水汽和能量。世界各国学者利用探空气球^[2]、MST 雷达^[3]以及数值天气预报再分析(ERA)等手段与资料,针对对流层顶开展了广泛研究,也取得一定成果。但传统探空手段均无法提供较高垂直分辨率的对流层顶结构数据,且成本高,已经无法满足更深层次的对流层顶结构与气候变化关系的研究需求。

GNSS 无线电掩星技术具有较高的垂直探测分辨率以及全球覆盖的特点,有效打破了探空气球、MST 雷达等观测手段的局限,被广泛应用于地球大气的三维立体探测。针对众多无线电掩星产品,学者们开展了大量科学实验。刘艳等^[4]利用 COSMIC/GPS 掩星折射率资料研究得出全球海洋边界层顶高度的季节变化、年际变化和日变化的气候学特点,徐寄遥等^[5]利用 COSMIC 数据分析全球对流层顶温度和高度变化特征,刘久伟等^[6]利用 COSMIC/GPS 掩星干温及干压资料探测对流层顶的高度,Borsche 等^[7]利用

CHAMP 掩星观测资料分析热带对流层顶温度和高度的分布及变化特征,Schmidt 等^[8]利用 CHAMP 掩星观测资料分析对流层顶高度、温度、气压等参数的空间变化及年际变化等。这些研究基本上都是利用国外的 GNSS 掩星数据,且数据量不足。

2013-09 我国发射 FY-3C 卫星,其搭载的 GNOS 载荷是国内第一个星上 GNSS 无线电掩星探测仪,也是国际上首台兼容北斗导航系统(BDS)和全球定位系统(GPS)的掩星探测仪^[9]。FY-3C 卫星每天可以分别得到 200 次北斗掩星事件以及 500 次 GPS 掩星事件^[10],这为气象研究提供了丰富的高精度、全方位、全天时观测资料。为了验证我国首个无线电掩星探测仪的数据价值,本文使用国家卫星气象中心(<http://satellite.nsmc.org.cn>)提供的 2017-03-01~2018-02-28 期间 GNSS 无线电掩星附加相位数据,通过 ROPP 软件^[11]反演得到大气温度廓线,并分析中国区域对流层顶参数随纬度的分布状况以及季节性变化特征。

1 观测数据与方法

1.1 观测数据

无线电掩星观测技术可以完成对大气剖面高

收稿日期:2020-04-19

项目来源:中德科学基金(41761134092)。

第一作者简介:郭佳宾,硕士生,主要从事 GNSS 气象学研究,E-mail:1292196066@qq.com。

通讯作者:金双根,教授,主要从事 GNSS 卫星导航与大地测量研究,E-mail:sgjin@shao.ac.cn。

垂直分辨率的观测,其探测高度可以从地面延伸到 60 km 高度处,覆盖整个对流层与平流层。但是每一条掩星廓线的位置是由 FY-3C 卫星和被掩 GNSS 卫星的位置决定的,分布比较稀疏。图 1(a)展示了 2017-03-01~03-07 掩星事件在中国区域的分布状况,可以看到,在整个中国区域只有较少的掩星数据。图 1(b)展示了 2017 年整个 3 月份的掩星事件在中国区域的分布状况,此时整个中国区域覆盖了大量的掩星事件,且分布较为均匀,这为我们使用掩星数据分析中国区域对流层顶参数提供了思路。

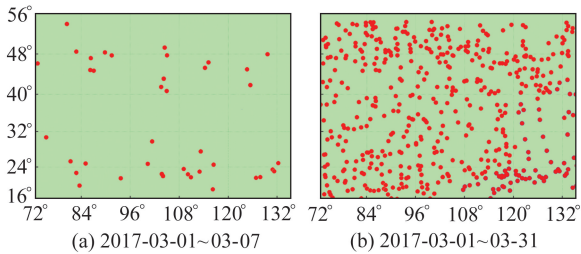


图 1 中国区域掩星事件分布

Fig. 1 Distribution of occultation events in China

本文选取 2017-03-01 ~ 2018-02-28 共计 148 349 条 Level-1 级数据的附加相位数据,借助掩星处理软件 ROPP 计算得出大气温度廓线。

1.2 中国区域时空特征划分

我国地域辽阔,东西、南北跨度大,且具有四季分明的特点。因此,在空间上,使用 $2^\circ \times 2^\circ$ 的空间分辨率将整个中国区域划分为 608 个网格,然后统计落在每个网格内的掩星廓线数量,计算出每个网格点的对流层顶高度及温度的平均值;在时间上,考虑到 GNOS 掩星每天的掩星点落在在中国区域较少的状况,通过分析不同月份的对流层顶参数变化,进而得到对流层顶参数的季节性变化情况。

1.3 掩星数据精度验证与估计对流层顶高度

在使用 FY-3C 掩星数据计算对流层顶高度时,首先要对其进行精度验证,以保证结果的准确性。本文分别使用探空气球数据以及 ERA5 数据对掩星数据反演温度剖面精度进行验证。为了保证实验数据的普遍准确度,选择 2018-09-01 ~ 09-30 的 FY-3C 掩星数据进行验证。

在与探空气球数据比较时,首先对掩星数据和探空气球数据进行时空匹配。匹配标准为:二者观测的时间差值在 2 h 之内,水平距离在 150 km 之内。基于该标准匹配后,共得到 134 对匹配数据。在 134 对数据中,由于探空气球数据文件在记录时存在较多的以数值 9999 或者 -9999 代替缺省值,故需要对存在缺省值的探空数据进行剔除。剔

除后,整个 9 月一共得到 89 组匹配数据。在与 ERA5 数据进行比较时,为计算方便,选择 2018-09 每一天中午 12:00 的 ERA5 温度数据;然后对掩星数据和 ERA5 温度数据进行时间和空间匹配,匹配标准与探空气球一致;基于该标准匹配后,整个 9 月一共得到 30 组匹配数据。

国际上对于对流层顶高度的计算,主要有最冷点对流层顶与温度递减率对流层顶两种方法。其中,温度最低点对流层顶法(cold point tropopause, CPT)主要是依据温度垂直廓线上最冷点对应的高度(该高度所对应的温度称为对流层顶温度)来确定^[12]。而用大气温递减率法 LRT (lapse rate tropopause)来确定对流层顶高度,根据 WMO 于 1957 年给出的标准,如果递减率小于 2 K/km,且在此高度向上 2 km 的范围内温度递减率平均不超过 2 K/km 时,则认为该范围的最低高度为对流层顶高度^[13]。大气温递减率的定义为:

$$\Gamma = \frac{\partial T}{\partial h} \quad (1)$$

其中, T 为温度, h 为高度,按照由低到高的方法计算递减率。

当使用探空资料作为对照组时,探空气球使用 CPT 法计算对流层顶高度, FY-3C GNOS 资料分别使用 CPT 法与 LRT 法计算对流层顶高度,二者的对比结果如图 2 所示。

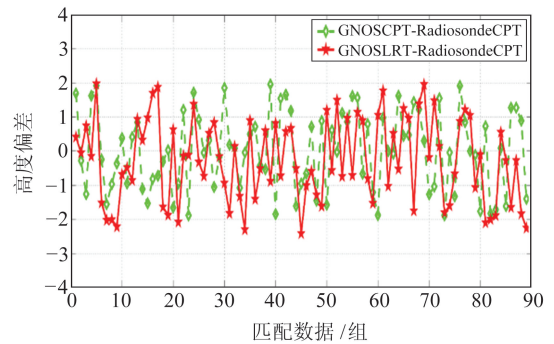


图 2 不同方法计算的结果对比

Fig. 2 Comparison of calculation results by different methods

由图 2 可见,两种方法计算得出的对流层顶高度与使用探空气球计算得出的对流层顶高度差别不大,其中 GNOSCPT-RadiosondeCPT 的偏差基本在 ± 2 km 以内, GNOSLRT-RadiosondeCPT 的偏差均在 ± 2.5 km 以内。将上述数据进行统计,结果见表 1。

由表 1 可知,使用两种方法计算得出的对流层顶高度与使用探空气球数据计算结果的平均偏差均不超过 1 km,均方根误差不超过 1.3 km。

可以看出,使用 FY-3C 掩星数据计算对流层顶高度具备可行性。

表 1 两种计算方法的精度对比

Tab. 1 Comparison of precision of two calculation methods

	平均偏差/km	均方根误差/km
GNOSCPT-RSCPT	0.856 3	1.164 1
GNOSLRT-RSCPT	-0.567 2	1.259 2

当使用 ERA5 资料作为对照组时,ERA5 数据使用 CPT 方法计算对流层顶高度, FY-3C GNOS 资料分别使用 CPT 法与 LRT 法计算对流层顶高度,二者的对比结果如图 3 所示。

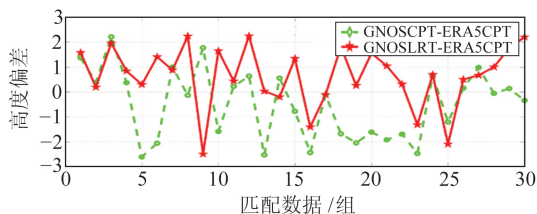


图 3 不同方法计算结果对比

Fig. 3 Comparison of calculation results by different methods

由图 3 可见,两种方法计算得出的对流层顶高度与使用 ERA5 数据计算得出的对流层顶高度差别不大,其中 GNOSCPT-ERA5CPT 的偏差均在 ± 3 km 以内,GNOSLRT-ERA5CPT 的偏差均在 ± 2 km 以内。将上述数据进行统计,结果见表 2。

表 2 两种计算方法的精度对比

Tab. 2 Comparison of precision of two calculation methods

	平均偏差/km	均方根误差/km
GNOSCPT-ERA5CPT	0.463 6	1.459 9
GNOSLRT-ERA5CPT	0.674 1	1.372 4

由表 2 可知,使用两种方法计算得出的对流层顶高度与使用 ERA5 数据计算的结果平均偏差均不超过 0.7 km,均方根误差不超过 1.4 km。可以看出,使用 FY-3C 掩星数据计算对流层顶高度具备可行性。

在验证 FY-3C 掩星数据精度后,下文的对流层顶高度计算使用了 CPT 方法。

2 结果与分析

2.1 对流层顶参数空间特征变化

图 4 展示了掩星廓线数量随纬度的变化情况,可以看出,在 $32^{\circ}\sim 34^{\circ}\text{N}$ 上数据量最少,为 251 条;在 $48^{\circ}\sim 50^{\circ}\text{N}$ 上数据量最多,为 471 条。

图 5 展示了掩星事件数目随经纬度的变化情况,可以看出,在 $16^{\circ}\sim 24^{\circ}\text{N}$ 和 $42^{\circ}\sim 56^{\circ}\text{N}$ 上的掩星廓线数目较多,在 $24^{\circ}\sim 42^{\circ}\text{N}$ 上的每个栅格里的掩星廓线数目较少。综合图 4、图 5 可以看出,

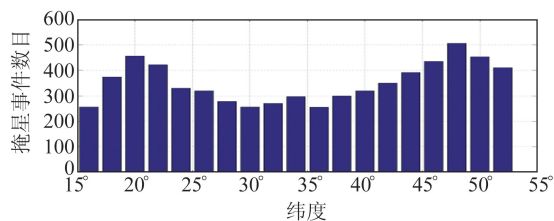


图 4 掩星事件数目随纬度的变化特征

Fig. 4 Variation of occultation events with latitude

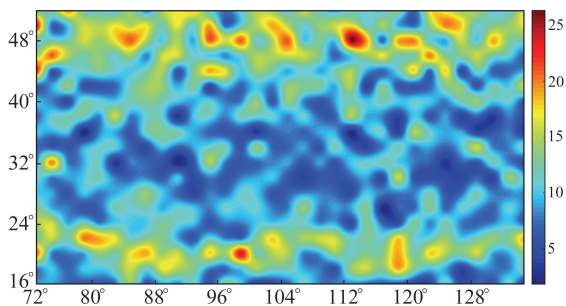


图 5 掩星事件数目分布

Fig. 5 Distribution of occultation events

FY-3C 掩星数据基本覆盖了整个中国区域。

图 6 展示了研究时段内对流层顶高度、温度随经纬度的变化,可以看出,中国区域的对流层顶高度以及温度具有明显的纬度分布特征,即随纬度变化较为明显,随经度的变化较小。由图 6(a)可见,中国南部区域对流层顶高度高于中国北部区域,中国西部区域对流层顶高度高于中国东部区域。在整个 $16^{\circ}\sim 54^{\circ}\text{N}$ 范围内,可以明显看到对流层顶高度随纬度分带分布的现象。由图 6(b)可见,中国南部区域对流层顶温度低于北部区域,中国西部区域对流层顶温度略低于东部区域,在整个 $16^{\circ}\sim 54^{\circ}\text{N}$ 范围内,也可以看到明显的条带分布现象。

从上文可知,对流层顶参数随纬度变化较为明显。图 7 展示了对流层顶高度、温度随纬度的变化。总体来看,随着纬度的升高,对流层顶高度逐渐减小,对流层顶温度逐渐增大,但是到 42°N 开始出现略微下降。由图 7(a)可见,在研究时段内,对流层顶高度随着纬度的升高总体上呈现出递减的趋势。在 $22^{\circ}\sim 24^{\circ}\text{N}$ 存在最大值 17.29 km,在 $52^{\circ}\sim 54^{\circ}\text{N}$ 存在最小值 10.45 km, $16^{\circ}\sim 28^{\circ}\text{N}$ 的低纬度处减小速率较缓,在 $28^{\circ}\sim 40^{\circ}\text{N}$ 处的中纬度地区对流层顶高度骤减且减小速率较大, $40^{\circ}\sim 56^{\circ}\text{N}$ 处减小速率开始趋缓。由图 7(b)可见,对流层顶温度随纬度的升高而呈现升高的趋势,在 $16^{\circ}\sim 18^{\circ}\text{N}$ 处有最小值 -81.62°C ,在 $42^{\circ}\sim 44^{\circ}\text{N}$ 处有最大值 -55.84°C ,在 $16^{\circ}\sim 22^{\circ}\text{N}$ 区间内增长速度较缓,在 $22^{\circ}\sim 40^{\circ}\text{N}$ 区间内增长较为迅速,在 $40^{\circ}\sim 56^{\circ}\text{N}$ 区间内增长放缓。

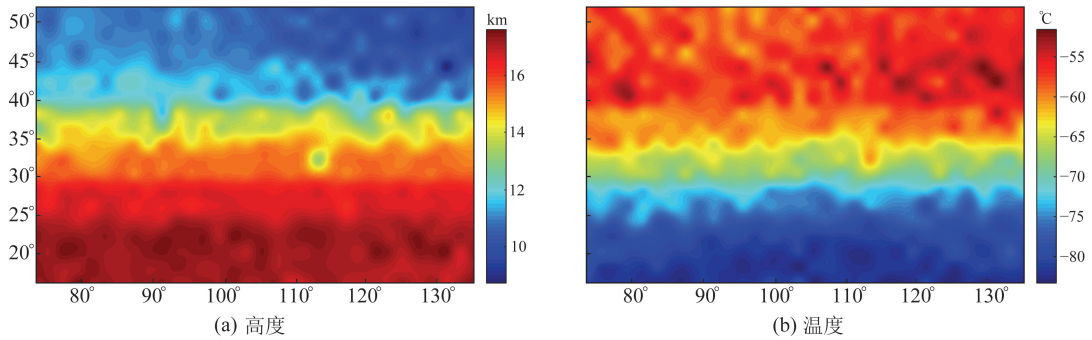


图6 对流层顶高度、温度随经纬度的变化

Fig. 6 Variation of tropopause height, temperature with latitude and longitude

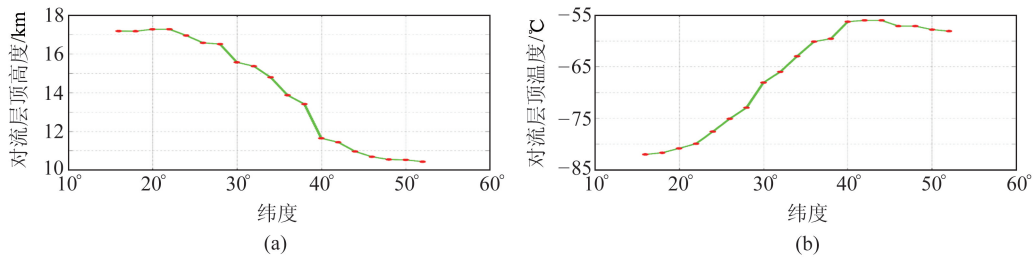


图7 对流层顶高度、温度随纬度的变化

Fig. 7 Variation of tropopause height and temperature with latitude

2.2 对流层顶参数的季节性变化

上文研究表明,在空间特征上,中国区域内对流层顶参数随纬度变化较为明显,在经度上变化并不明显。所以可以在保持纬度值不变的情况下,通过观察对流层顶参数随时间的变化,来研究对流层顶随时间的变化特征。表3展示了25°N、35°N、45°N对流层顶高度与温度的最大值与最小值以及最大值与最小值出现的月份差,由表可知,对流层顶高度最大值到最小值的转变,二者相差了5~6个月;对流层顶温度最大值到最小值的转变,二者相差了7~8个月。因此可以确定,对流层顶参数具有较为明显的随时间变化的特征。

表3 对流层顶高度的最大值与最小值

Tab. 3 Maximum and minimum of tropopause height

	最大值/km	最小值/km	差值/km	差值间隔月数
25°N	17.10	15.96	1.14	5
35°N	13.99	12.01	1.98	6
45°N	11.96	10.03	1.93	5

表4 对流层顶温度最大值与最小值

Tab. 4 Maximum and minimum of tropopause temperature

	最大值/°C	最小值/°C	差值/°C	差值间隔月数
25°N	-83.24	-85.61	2.37	8
35°N	-65.36	-69.35	3.99	7
45°N	-60.27	-63.12	2.85	8

图8(a)~(d)分别为研究时段内春、夏、秋、冬季所对应的对流层顶高度,可以看出,随着春-夏-秋-冬季节的轮替,对流层顶高度出现升高-降低-降低的趋势,这一结果与单映颖^[14]等人对中国区域对流层顶的研究结果一致。在4个季节时间段内,

均存在对流层顶高度急剧下降的纬度值,春季为28°N,夏季为34°N,秋季为35°N,冬季为30°N。可以看出,对流层顶高度最小值出现在冬季的东北地区。春季的最大值出现在46°~48°N、22°~76°E的栅格内,最小值出现在22°~24°N、76°~78°E的栅格内;夏季的最大值出现在50°~52°N、132°~134°E的栅格内,最小值出现在16°~18°N、114°~116°E的栅格内;秋季的最大值出现在52°~54°N、132°~134°E的栅格内,最小值出现在22°~24°N、112°~114°E的栅格内;冬季的最大值出现在48°~50°N、128°~130°E的栅格内,最小值出现在24°~26°N、132°~134°E的栅格内。

图9(a)~(d)分别为研究时段内春、夏、秋、冬季所对应的对流层顶温度。在每一个分图上都可以明显看到3个条带。每一个季节里,北方区域的对流层顶温度都要高于南方。伴随着春-夏-秋-冬季节的轮替,对流层顶温度出现升高-降低-降低的趋势。春季的最大温度值-47.68 °C出现在46°~48°N、98°~100°E的栅格内,最小值-86.76 °C出现在16°~18°N、92°~94°E的栅格内;夏季的最大温度值-42.81 °C出现在40°~42°N、72°~74°E的栅格内,最小值-86.12 °C出现在16°~18°N、82°~84°E的栅格内;秋季的最大温度值-47.68 °C出现在48°~50°N、74°~76°E的栅格内,最小值-86.17 °C出现在20°~22°N、110°~112°E的栅格内;冬季的最大温度值-49.19 °C出现在42°~44°N、132°~134°E的栅格内,最小值-87.68 °C出现在18°~

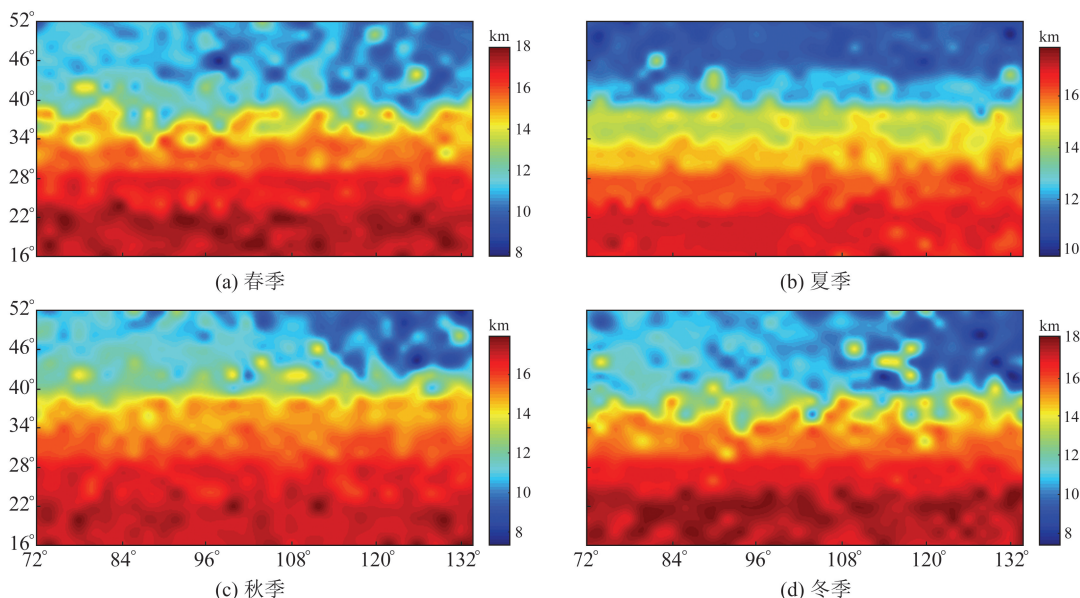


图 8 中国区域对流层顶高度在 4 个季节的分布

Fig. 8 Distribution of tropopause height over China in spring, summer, autumn and winter

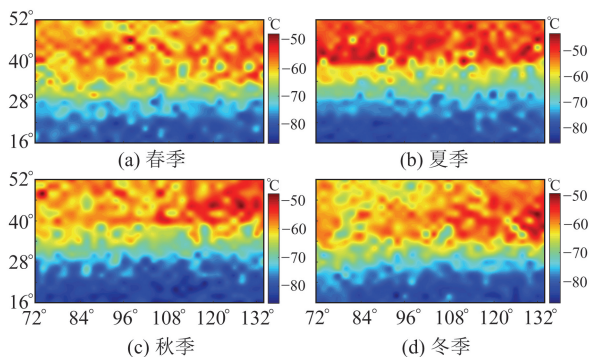


图 9 中国区域对流层顶温度在 4 个季节的分布

Fig. 9 Distribution of tropopause temperature in spring, summer, autumn and winter in China

20°N、94°~96°E 的栅格内。

在 4 个季节时间段内,春季与秋季的温度随纬度变化特征较为相似,且东部地区温度要高于西部地区;在夏季,西北地区对流层顶温度高于东北地区,西南地区对流层顶温度低于东南地区;冬季正好与夏季相反,东北地区对流层顶温度高于西北地区,西南地区对流层顶温度高于东南地区。

3 结 语

本文首次使用 FY-3C 掩星数据对 2017-03-01~2018-02-28 中国区域的对流层顶结构参数进行研究。首先利用 ROPP 软件处理相位延迟数据,获得温度廓线,估计对流层顶参数;然后分别使用探空气球数据和 ERA5 数据对反演结果进行验证;最后根据 CPT 方法估计了中国区域对流层顶的温度和高度参数。通过分析统计,结论如下:

1)FY-3C 掩星资料反演得出的对流层顶参数与 ERA5 和探空气球数据得出的结果比较一致,表

明 FY-3C 掩星数据能够估计对流层顶的变化。

2)中国区域对流层顶高度以及温度随纬度变化呈现出明显的分带现象。其中对流层顶高度随纬度的升高而降低,即北方对流层顶高度低于南方,且在中纬度地区出现了对流层顶高度随纬度降低速率急剧加快的现象;对流层顶温度随纬度的升高而升高,即北方对流层顶温度高于南方,且在中纬度地区出现了对流层顶温度增加速率急剧加快的现象。

3)对流层顶高度与温度具有随时间变化的特征。在研究时间段内,对流层顶高度参数从最大值到最小值或最小值到最大值的过渡过程中,均有较大的时间间隔。通过将研究时间段分为春、夏、秋、冬 4 个季节进行统计发现,对流层顶高度随春-夏-秋-冬季节变化表现出升高-降低-降低的趋势;对流层顶温度表现为春、秋季节变化相似,冬、夏季节变化相反的现象。

参考文献

[1] 张永林,蔡昌盛. 基于再分析资料 ERA5 的对流层延迟估计方法及精度评估[J]. 大地测量与地球动力学, 2020, 40(1): 62-65 (Zhang Yonglin, Cai Changsheng. Method and Accuracy Assessment of Zenith Tropospheric Delay Derived from ERA5 Re-Analysis Data[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2020, 40(1): 62-65)

[2] Seidel D J, Randel W J. Variability and Trends in the Global Tropopause Estimated from Radiosonde Data[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2006, 111(D21)

[3] Das S S, Patra A K, Narayana Rao D. VHF Radar Echoes in the Vicinity of Tropopause during the Passage of Tropical Cyclone: First Observations from the Gadanki MST Radar

- [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2008, 113(D9)
- [4] 刘艳, 唐南军, 杨学胜. 利用 COSMIC/GPS 掩星折射率资料研究海洋边界层高度的特点[J]. *热带气象学报*, 2015(1):43-50(Liu Yan, Tang Nanjun, Yang Xuesheng. Height of Atmospheric Boundary Layer Top as Detected by Cosmic GPS Radio Occultation Data[J]. *Journal of Tropical Meteorology*, 2015(1):43-50)
- [5] 袁韡, 徐寄遥, 马瑞平. 利用 COSMIC 数据分析全球对流层顶温度和高度变化特性[J]. *空间科学学报*, 2009, 29(3):311-318(Yuan Wei, Xu Jiyao, Ma Ruiping. Variation Characteristics of Tropopause Temperature and Height from COSMIC[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2009, 29(3): ;311-318)
- [6] 刘久伟, 韩科月. 利用 COSMIC/GPS 掩星干温及干压资料探测对流层顶的高度[J]. *测绘科学技术学报*, 2018(2):121-125(Liu Jiwei, Han Keyue. Height of Tropopause as Detected by COSMIC/GPS Radio Occultation Dry Temperature and Dry Pressure[J]. *Journal of Geomatics Science and Technology*, 2018(2):121-125)
- [7] Borsche M, Kirchengast G, Foelsche U. Tropical Tropopause Climatology as Observed with Radio Occultation Measurements from CHAMP Compared to ECMWF and NCEP Analyses[J]. *Geophysical Research Letters*, 2007, 34(3):L03702
- [8] Schmidt T, Wickert J, Beyerle G, et al. Tropical Tropopause Parameters Derived from GPS Radio Occultation Measurements with CHAMP[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2004, 109(D13):D13105
- [9] 廖蜜, 张鹏, 毕研盟, 等. 风云三号气象卫星掩星大气产品精度的初步检验[J]. *气象学报*, 2015(6):1131-1140(Liao Mi, Zhang Peng, Bi Yanmeng, et al. A Preliminary Estimation of the Radio Occultation Products Accuracy from the Fengyun-3C Meteorological Satellite[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2015(6):1131-1140)
- [10] 金双根, 高超, 李君海. 利用 FY-3C 气象卫星 GNSS 掩星估计全球重力波变化与分析[J]. *南京信息工程大学学报: 自然科学版*, 2020, 12(1):57-67(Jin Shuanggen, Gao Chao, Li Junhai. Estimation and Analysis of Global Gravity Wave Using GNSS Radio Occultation Data from FY-3C Meteorological Satellite[J]. *Journal of Nanjing University of Information Science and Technology: Natural Science Edition*, 2020, 12(1):57-67)
- [11] Culverwell D, Lewis H W, Offiler D, et al. The Radio Occultation Processing Package, ROPP [J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2015, 8(4):1887-1899
- [12] Han T T, Ping J S, Zhang S J. Global Features and Trends of the Tropopause Derived from GPS/CHAMP RO Data[J]. *Science China: Physics, Mechanics and Astronomy*, 2011, 54(2):365-374
- [13] Thomas R. Determining the Tropopause Height from Gridded Data[J]. *Geophysical Research Letters*, 2003, 30(20):2042
- [14] 单映颖, 夏朋飞, 叶世榕, 等. 利用 COSMIC 掩星折射率数据研究中国大陆地区对流层顶高度的时空特征[J]. *测绘科学技术学报*, 2019, 36(5):458-463(Shan Yingying, Xia Pengfei, Ye Shirong, et al. Spatio-Temporal Characteristics of the Tropopause Height over Land Area of China with Cosmic Radio Occultation Refractivity[J]. *Journal of Geomatics Science and Technology*, 2019, 36(5):458-463)

Variations of Tropopause Parameters over China from FY-3C GNSS Radio Occultation Observations

GUO Jiabin¹ JIN Shuanggen^{1,2}

1 School of Remote Sensing and Geomatics Engineering, Nanjing University of Information Science and Technology, 219 Ningliu Road, Nanjing 210044, China

2 Shanghai Astronomical Observatory, CAS, 80 Nandan Road, Shanghai 200030, China

Abstract: We use the GNSS occultation data of Fengyun 3C meteorological satellite independently developed by China to retrieve the atmospheric temperature profile from March 1, 2017 to February 28, 2018. We estimate tropopause height change and verify it using the sounding balloon data and ERA5 model data. With a spatial resolution of $2^\circ \times 2^\circ$, China is divided into 608 cells according to latitude and longitude. For each cell, we calculate the tropopause parameters, and a grid model is established to analyze the temporal and spatial distribution characteristics of tropopause parameters in China. The results show that the tropopause parameters have obvious zonation characteristics with latitude, but not obvious change in longitude, which shows that the north-south region is asymmetric, and the east-west region is more symmetrical. The tropopause parameters have obvious seasonal characteristics.

Key words: occultation; tropopause height; FY-3C; accuracy analysis; tropopause temperature

Foundation support: China-German Science Foundation(NSFC-DFG), No. 41761134092.

About the first author: GUO Jiabin, postgraduate, majors in GNSS meteorology, E-mail: 1292196066@qq.com.

Corresponding author: JIN Shuanggen, professor, majors in GNSS satellite navigation and geodesy, E-mail: sgjin@shao.ac.cn.