

WANG Cong, YANG Junfeng, CHENG Xuan, GUO Wenjie, LI Jiawei, YANG Guanglin, ZHANG Xiaoxin, YANG Zhongdong, HU Xiuqing, GU Songyan, ZHANG Peng. Investigation of the Global Gravity Wave Activity Characteristics from the FY-3C Satellite Observation Data (in Chinese). *Chinese Journal of Space Science*, 2023, **43**(2): 260–272. DOI:10.11728/cjss2023.02.211108111

基于风云 3C 卫星观测数据的全球重力波活动特性研究*

王 聪^{1,3} 杨钧烽² 程 旋² 郭文杰²
李嘉巍^{1,3} 杨光林^{1,3} 张效信^{1,3} 杨忠东³
胡秀清³ 谷松岩³ 张 鹏³

1(中国气象局国家空间天气监测预警中心 空间天气重点实验室 北京 100081)

2(中国科学院国家空间科学中心 北京 100190)

3(国家卫星气象中心 北京 100081)

摘 要 大气重力波是临近空间中重要的动力学过程之一,并且广泛存在于全球大气层中,研究其全球分布及变化规律,对理解大气动力学具有重要意义。全球卫星导航系统(GNSS)可以通过掩星的方式来获取临近空间大气的温度信息,并且具有全球覆盖、垂直和水平分辨率较高的优点,从而被广泛应用于临近空间大气重力波研究。利用气象卫星风云 3 号 C 星(FY-3C)搭载的全球导航卫星掩星接收机(GNOS)的探测数据来反演全球重力波扰动分布,反演得到了 2015—2019 年这 5 年间的全球重力波分布,并着重分析了全球重力波的季节变化、年际变化以及长波和短波重力波的全球分布和特征。结果表明,冬夏两季的重力波扰动要强于春秋两季,并且呈现冬季半球强于夏季半球的现象;同时还发现,重力波扰动的强度随着高度增加而逐渐增强;在 20~50 km 的高度范围内短波重力波强度大于长波重力波强度。

关键词 风云 3C 卫星, 临近空间, 重力波, 全球分布

中图分类号 P351

Investigation of the Global Gravity Wave Activity Characteristics from the FY-3C Satellite Observation Data

WANG Cong^{1,3} YANG Junfeng² CHENG Xuan² GUO Wenjie²

* 国家卫星气象中心青年人才基金项目(202104QT042),国家自然科学基金项目(11872128, 91952111)和中国科学院国家空间科学中心“青年科技创新”课题(E1PD40018S)共同资助

2021-11-05 收到原稿, 2022-11-08 收到修定稿

E-mail: gwj2127@163.com

©The Author(s) 2023. This is an open access article under the CC-BY 4.0 License
(<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

LI Jiawei^{1,3} YANG Guanglin^{1,3} ZHANG Xiaoxin^{1,3} YANG Zhongdong³
 HU Xiuqing³ GU Songyan³ ZHANG Peng³

1(Key Laboratory of Space Weather, National Center for Space Weather, China Meteorological Administration, Beijing 100081)

2(National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190)

3(National Satellite Meteorological Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081)

Abstract Atmospheric gravity wave is one of the important dynamical processes in near-space, and exists widely in the global atmosphere. The investigation of its global distribution and variation is of great significance for understanding atmospheric dynamics. Though occultation, the Global Navigation Satellite System (GNSS) has the advantages of obtaining the global coverage and high resolution temperature information of near-space atmosphere, and is therefore widely used in near-space atmospheric gravity wave research. The global gravity wave distribution from 2015 to 2019 is analyzed by using the detection data of the Global Navigation Satellite System Occultation Sounder (GNOS) on the FY-3C satellite. The seasonal and interannual variations of global gravity waves as well as the global distribution and characteristics of long and short wave gravity waves are analyzed emphatically. The analysis show that the gravity wave intensity in winter and summer is stronger than that in spring and autumn, and the value of the gravity wave intensity in winter hemisphere is higher than that in summer hemisphere. It is also found that the intensity of gravity wave disturbance increases gradually with the increase of height. Combined with years of data analysis, it is found that the short-wave gravity wave intensity is greater than the long-wave gravity wave intensity in the altitude range of 20~50 km.

Key words FY-3C satellite, Near space, Gravity waves, Global distribution

0 引言

重力波是临近空间主要大气波动之一,在中高层大气环境变化中扮演十分关键的角色。重力波能够对全球大气的小尺度和大尺度动力学过程产生深远影响,对大气温度、密度、风场和化学成分变化过程及各圈层之间能量动量传输的耦合过程都具有重要作用^[1-3]。

由于卫星探测数据具有较高的空间分辨率,近年来常被用于平流层重力波研究^[4]。2006年, Wu等^[5]利用不同的卫星探测数据对全球重力波敏感性进行了分析。2008年, Alexander等^[6]在利用 HIRD-DLS的数据对重力波的振幅、垂直波长和水平波数等参量进行研究,并得出了全球重力波动量通量分布。同年, Wu等^[7]利用 2004—2007年 MLS/Aurora上 118 GHz 辐射率资料对不同波长的重力波进行了分析。2009年, Preusse等^[8]利用 TIMED/

SABER 辐射数据分析了全球重力波分布。2011年, Zhang等^[9]利用 TIMED/SABER 临边温度数据,通过重力波扰动的时空变化特征分析了中层大气重力波的整体分布。2013年, Hoffmann等^[10]利用 AIRS 卫星研究全球冬季重力波活动频次以及活动强度的分布特性。Liu等^[11]使用 SOFIE/AIM 探测到 10~102 km 高度的温度廓线,对极地平流层至中间层内的重力波进行了研究,分析了季节变化、高度变化以及经度变化等方面的特性。Miller等^[12]利用 DNB 资料观测了各种波源产生的在中间层(约 90 km)的重力波活动,这些波源包括地形、深对流、锋面系统、急流、地震、火山爆发等,其形态特征也不尽相同。以上研究主要是采用国际上的卫星遥感资料,利用国内卫星遥感资料研究全球重力波的学者则比较少^[13]。

气象卫星风云 3 号 C 星(FY-3C)是中国第二代极轨气象卫星,装载有大气微波垂直探测器、全球导

航卫星掩星接收机(GNOS)等大气探测设备,观测数据可用于临近空间环境监测和研究。FY-3C上搭载的GNOS载荷是国内第一个星上无线电掩星探测仪,该载荷也可以同时接收北斗与GPS信号,显著提升了探测能力。GNOS载荷在垂直方向上具备分辨率高等特点。2019年,Yao等^[13]分析了FY-3C微波大气垂直探测器中辐射通道在研究临近空间(尤其是平流层)强重力波扰动中的优势和特点;Jin等^[14]通过GNOS的探测数据,对2014年8月—2016年12月全球重力波参数的分布特征进行了分析。这些研究分析了FY-3C在监测临近空间重力波扰动中的一些优势,同时卫星在轨运行多年,积累了大量的探测数据,可对全球重力波扰动变化进行时空变化研究。

本文利用FY-3C搭载的全球导航卫星掩星接收机(GNOS)2015—2019年的温度探测数据来分析全球重力波扰动分布,着重分析了全球重力波在季节、年际间以及在高度、纬度上的变化和分布特征。为了进一步分析重力波垂直波长的特点,本文也首次将重力波分为长波重力波(12~20 km)和短波重力波(2~10 km)进行分析。

1 数据和方法

1.1 数据来源

FY-3C卫星是中国第二代极轨气象卫星,于2013年成功发射,可在全球范围内获取全天候、定量、三维的大气信息。FY-3C卫星是在太阳同步轨道上运行的气象卫星,轨道平均高度为836 km,轨道周期约为101.5 min^[15]。GNOS是搭载在FY-3C卫星上的全球导航卫星掩星接收机,由三根天线、三个射频单元和一个电子单元组成,并且采用了高动态、高灵敏度的信号采集和跟踪技术^[15],可以通过接收GPS和BDS的卫星导航信号来反演获得大气中的温度、湿度等参数廓线^[14,16]。通过精密定轨、大气参数反演以及质量控制等处理过程,GNOS获取到的从地面到46 km处折射率的均值偏差为-0.09%(GNOS-GPS)和-0.04%(GNOS-BDS),其平均标准偏差分别为1.81%和1.26%^[16],其大气参数廓线(例如温度廓线)是长期稳定并且可以用于气候领域研究^[17]。本文选取2015—2019年共计5年的FY-3C-GNOS大气

温度廓线数据^{*},通过计算获取全球重力波分布并进行分析。

1.2 数据处理方法

综合考虑FY-3C掩星数据的数据量和数据分布,在保证每个网格(除极区个别网格外)内的廓线数相差不大的情况下,本文的统计分析区域纬度为90°S—90°N,分辨率为2°;经度设定在0°~360°之间,分辨率为4°;高度范围为20~50 km,分辨率为1 km。在季度上按北半球划分为:1,2和12月份为冬季,3—5月为春季,6—8月为夏季,9—11月为秋季。在提取大气重力波扰动前首先对FY-3C卫星探测的大气温度数据进行质量控制,在上述网格内将所有数据不计年份、按月份进行统计,剔除温度偏差在3倍标准偏差以外的温度数据。

大气重力波的提取方法采用较为常用的小扰动近似法,即认为观测到的温度廓线 $T(z)$ 由背景温度 $\bar{T}(z)$ 和扰动值 $T'(z)$ 叠加而成。背景温度根据网格内所有的温度廓线平均得到,每一条廓线减去平均值后得到的便是扰动值。对得到扰动廓线进行带通滤波,滤波的通带范围设置为2~20 km,因此得到的是垂直波长在2~20 km范围内的重力波引起的大气扰动。将得到的温度扰动取绝对值后,再按季度计算每个网格内的温度扰动值。将滤波的范围分别设置为2~10 km和12~20 km,分别对垂直波长较短的2~10 km重力波(短波)及垂直波长较长的12~20 km重力波(长波)全球分布特征进行了分析研究。分析不同垂直波长的重力波变化规律,可以反映出不同垂直波长的波对大气上下层耦合的贡献差异,对开展重力波参数化的高精度中高层大气数值预报具有一定的科学意义。

得到全球重力波扰动分布后,可以进一步计算出纬圈平均重力波活动强度随高度和纬度的变化情况。为研究不同纬度带上重力波扰动强度的年际变化,将全球分为五个纬度带,分别为赤道区域(南北纬15°S—15°N)、南北半球中纬度地区(南北纬20°S—40°N)、南北半球高纬度地区(50°S—80°N);高度分为3层,分别为20~30 km高度层、30~40 km高度层、40~50 km高度层,每组数据中的重力波扰动强度是该组数据内所有重力波扰动的平均强度。

^{*}<http://satellite.nsmc.org.cn>

2 数据处理结果

2.1 重力波全球分布特征

2.1.1 重力波全球分布特征

图 1 给出了 2015—2019 年 FY-3C 卫星观测数据分析的不同季节里 25 km 高度层上大气重力波 (2~20 km) 全球扰动强度分布结果。其中, 春季为每年的 3—5 月数据的集合; 夏季为每年的 6—8 月数据的集合; 秋季为每年的 9—11 月数据的集合; 冬季为每年的 1、2 和 12 月份数据的集合。从图 1 可以看到, 不同季节里 25 km 高度层的重力波活动强度具有明显的随纬度变化特征, 但是春夏秋冬四季赤道地区均存在一个较明显的重力波扰动带。

从扰动结果来看, 夏季重力波活动强度随纬度的变化存在两个明显的强扰动带, 一个是赤道区域 (15°S—15°N), 一个是南纬 50°附近 (大约在 40°S—60°S)。特别是上述区域的海陆交接的区域以及安第斯山脉和南极半岛附近, 重力波活动明显强于其他地区。夏季重力波扰动表现出明显的“南强北弱”的现象。冬季重力波活动强度分布与夏季的分布恰好相反, 南半球重力波活动较弱而北半球活动强, 这与使用 HIRDDLS/Aura^[6] 以及 MLS/Aura^[7] 所得到的冬夏两季的全球重力波分布结果一致。造成冬季和夏

季特征不同的主要原因是平流层纬向风风向不同: 北半球夏季平流层纬向风为东风, 准零风层阻碍了地形重力波上传, 因此夏季北半球重力波较弱; 北半球冬季平流层和对流层纬向风均为西风, 允许地形重力波上传, 因此冬季北半球重力波较强。此外, 北半球中纬度冬季重力波活动没有明显的带状结构, 尤其在亚欧大陆西北部临海地区重力波活动最强。重力波的产生机制有多种, 包括地形激发、深对流激发、风剪切激发以及波破碎再激发等。在所有的激发机制中, 地形激发的重力波是最普遍、最重要的一种激发机制。尤其在上下层耦合、能量传输过程中, 地形重力波有着至关重要的作用。因此, 对于重力波冬强夏弱的解释, 研究普遍认为的是由背景风对地形重力波的滤波作用导致的^[18-20]。

春季重力波扰动主要集中在赤道地区, 尤其在南北纬 10°之间, 存在一个明显的强扰动带; 随着纬度升高, 重力波活动强度呈减弱的趋势。此外, 在北半球的中高纬地区, 特别是亚欧大陆海陆交接的区域, 也存在较强的重力波活动。而南半球中高纬地区重力波活动相对较弱。秋季重力波活动的全球分布特征与春季结果比较相似, 强扰动区域主要集中在赤道地区, 区别在于中高纬地区的强扰动区域不是亚欧大陆北部而是南美洲南部的安第斯山脉地区。与春秋两

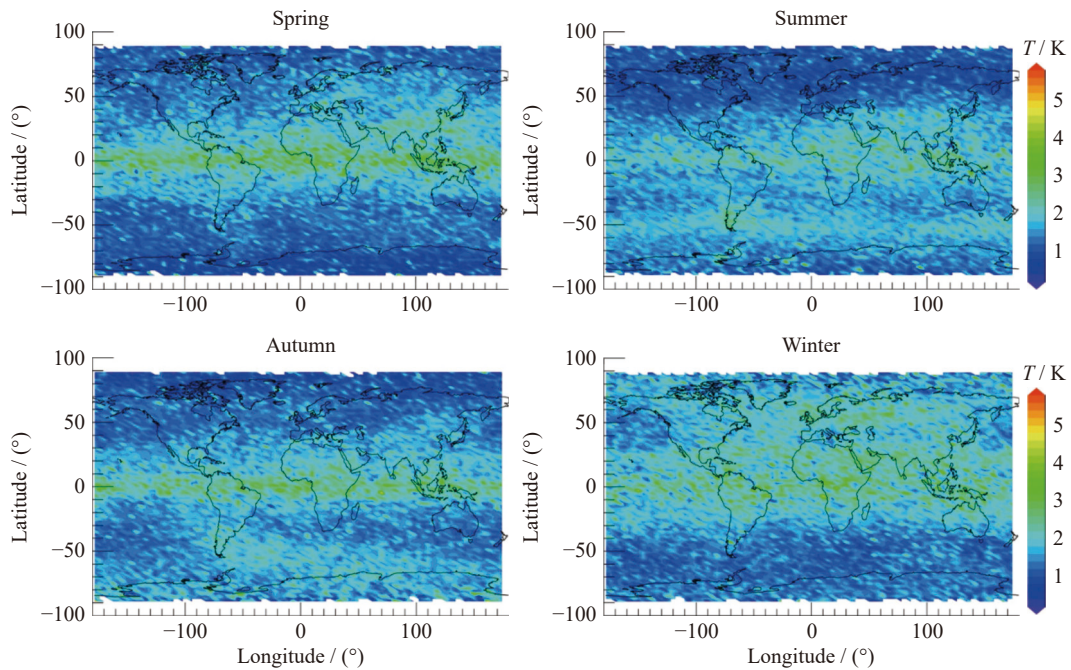


图 1 25 km 高度层全球重力波 (2~20 km) 扰动强度分布

Fig. 1 Distribution of global gravity wave (2~20 km) disturbance intensity at 25 km altitude

季节的结果相比,冬季和夏季赤道地区的重力波活动略弱一些。在一年四季中,赤道上空的重力波均比较强,这可能与赤道地区存在频繁的强对流天气有关。

图2给出了2015—2019年FY-3C卫星观测数据分析的35 km高度层全球扰动强度分布结果。从扰动结果来看,35 km高度层的重力波活动分布特征与25 km高度的结果具有较高的一致性。35 km高度上重力波活动主要集中在中低纬度地区(15°S—15°N)。此外,夏季安第斯山脉地区有较强的重力波活动,冬季北半球高纬度地区有较明显的重力波活动。图3给出的是2015—2019年FY-3C卫星观测数据分析的45 km高度层全球扰动强度分布结果。从扰动结果可以看出,45 km高度层全球扰动强度明显强于35 km(见图2)和25 km(见图1)高度的扰动结果。虽然三个高度层上的动力波扰动强度有所不同,但是重力波活动分布特征较为一致。

45 km高度层的重力波强度明显高于其他高度,并且随纬度变化的分布特征更为明显。Zhang等^[9]2011年的研究和Chen等^[21]2008的研究均发现了这一现象。重力波强度随高度增加而增强,这是由于大气密度指数递减的原因,相同的能量在同样体积的空气块内引起的扰动随高度指数增加。在45 km高度,春夏秋冬四季在赤道地区均有较强的重力波活动,尤

其在夏季和冬季,赤道地区重力波活动强度可以达到5 K。夏季时南半球要比北半球稍强一些,在北纬50°N—70°S区域内,重力波的强度要明显强于其他区域的强度;秋季则与春季相反,北半球重力波强度要略强于南半球重力波,在北纬40°N—10°S区域内,重力波的强度要明显强于其他区域的强度;冬夏两季则在赤道区域存在一条强度较大的重力波扰动带。同时,夏季时在南纬50°附近区域存在一条重力波扰动带,冬季时则在北纬50°附近存在一条重力波扰动带。

2.1.2 长波重力波全球分布特征

长波重力波的全球分布是指重力波垂直波长在12~20 km范围内的重力波扰动分布情况。图4~6分别给出了重力波长波在25 km, 35 km以及45 km高度上不同季节的全球分布结果。可以看出,重力波长波在不同高度上引起的重力波扰动都相对较小。在25 km高度(见图4),长波重力波的全球分布与重力波全谱分布基本一致,春夏秋冬四个季节在赤道地区均存在较强的重力波活动。另外,在夏季南半球高纬度地区(50°S附近)以及冬季北半球高纬度地区(尤其亚欧大陆东北部)存在较强重力波活动。25 km高度上长波重力波的扰动强度基本在1 K以内。

与25 km的结果相比,35 km高度层上重力波长波扰动具有相似的特性。同样,在赤道地区、夏季南

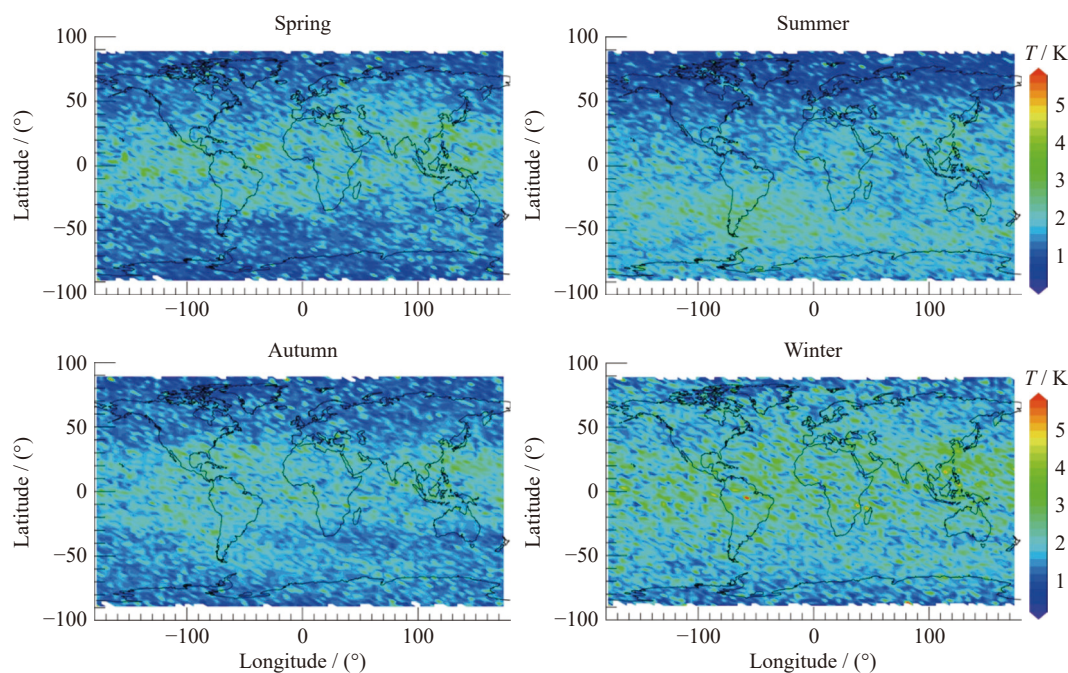


图2 35 km高度层全球重力波(2~20 km)扰动强度分布情况

Fig. 2 Distribution of global gravity wave (2~20 km) disturbance intensity at 35 km altitude

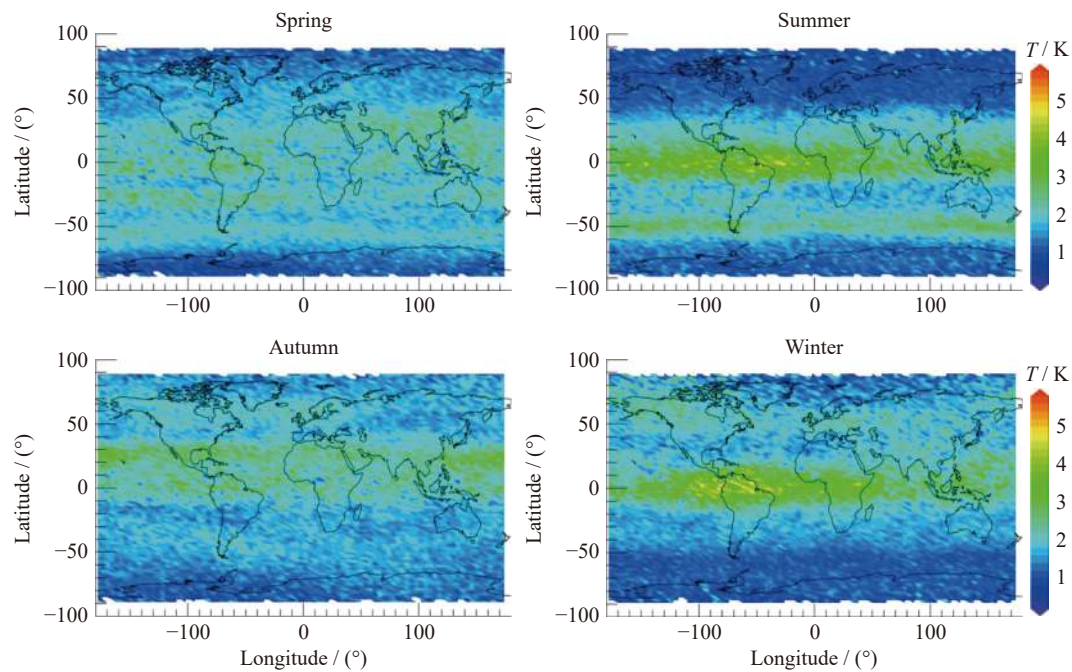


图 3 45 km 高度层全球重力波 (2~20 km) 扰动强度分布情况

Fig. 3 Distribution of global gravity wave (2~20 km) disturbance intensity at 45 km altitude

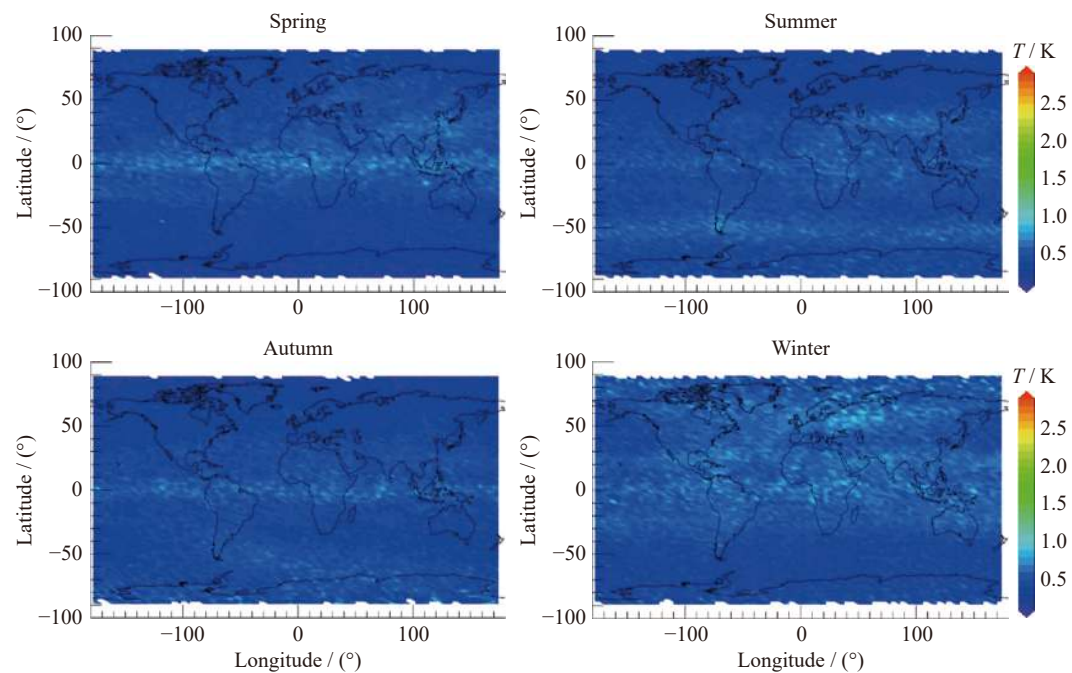


图 4 2015—2019 年 FY-3C 卫星观测数据分析的不同季节的 25 km 高度层全球重力波波长扰动强度分布

Fig. 4 Distribution of global gravity wave disturbance intensity at 25 km altitude in different seasons based on analysis of FY-3C observation data from 2015 to 2019

半球高纬度地区以及冬季北半球高纬度地区重力波活动强烈。但是相比之下, 35 km 高度上的重力波活动范围更广, 强度上也略强于 25 km 高度的结果, 扰

动强度可以达到 1 K 以上。

45 km 高度层长波重力波的扰动强度(见图 6)整体上要强于 25 km 和 35 km 高度层的强度, 冬夏季

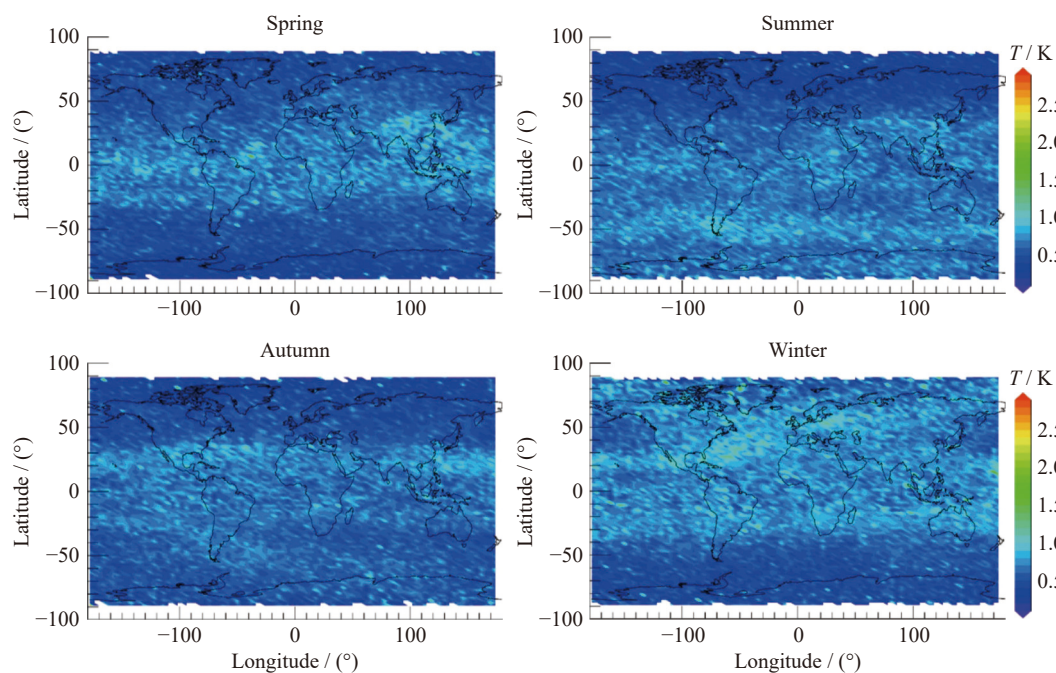


图 5 2015—2019 年 FY-3C 卫星观测数据分析的不同季节 35 km 高度层全球重力波长波扰动强度分布
Fig. 5 Distribution of global gravity wave disturbance intensity at 35 km altitude in different seasons
based on analysis of FY-3C observation data from 2015 to 2019

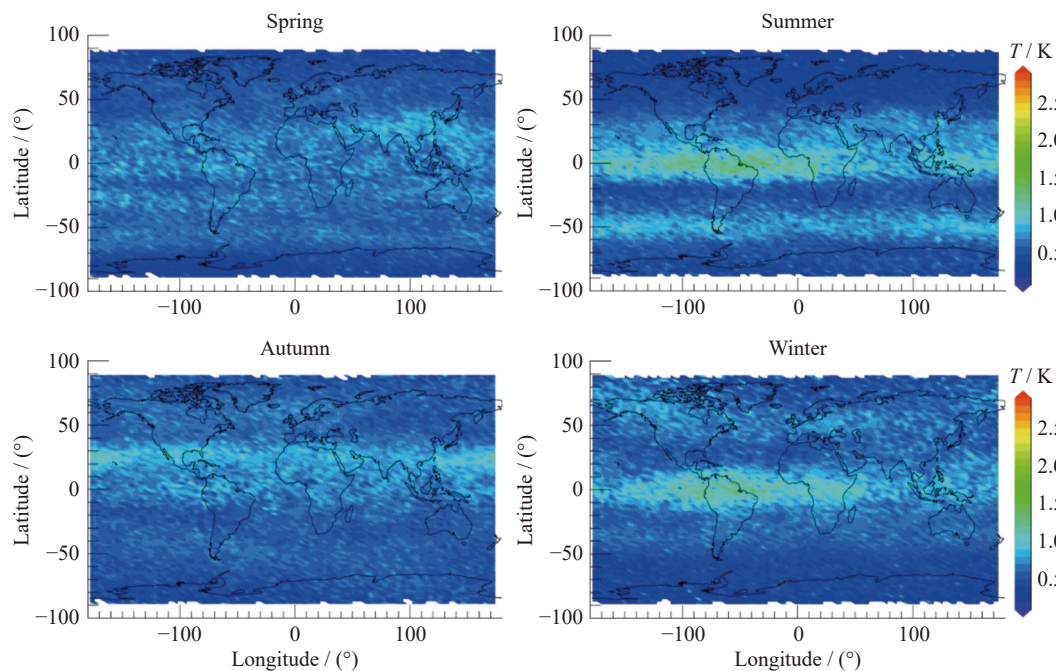


图 6 2015—2019 年 FY-3C 卫星观测数据分析的不同季节 45 km 高度层全球重力波长波扰动强度分布
Fig. 6 Distribution of global gravity wave disturbance intensity at 45 km altitude in different seasons
based on analysis of FY-3C observation data from 2015 to 2019

节西半球赤道地区最强的扰动值可以达到 1.5 K 以上。45 km 高度层的重力波分布具有更加明显的随

纬度变化的带状分布特征。可以看出,夏季南半球高纬度地区以及冬季北半球高纬度地区重力波活动强

烈,尤其在冬季和夏季西半球赤道地区,重力波活动最为明显。

2.1.3 短波重力波全球分布特征

短波重力波的全球分布是指重力波垂直波长在 2~10 km 范围内的重力波扰动分布情况。图 7~9 分别给出了重力波短波在 25 km, 35 km 以及 45 km 高度上不同季节的全球分布结果。可以看出,重力波短波扰动强度明显大于长波扰动强度。与 2~20 km 波长的长波重力波分布类似,春夏秋冬四个季节在赤道地区均存在较强的重力波活动,夏季南半球高纬度地区(尤其安第斯山脉附近)以及冬季北半球高纬度地区存在较强重力波活动;与长波重力波分布不同的是,短波重力波扰动强度随高度变化的趋势不明显,并且 25 km 高度层的短波重力波扰动强度要强于 35 km 高度层的扰动强度。

对比图 4~6 与图 7~9 的结果可知, FY-3C 卫星 GNOS 载荷观测的大气温度提取的重力波扰动主要以 2~10 km 垂直波长的重力波扰动为主。短波引起的大气平均扰动强度要远强于长波引起的扰动,长波的平均扰动强度基本在 1 K 以内,而短波的平均扰动最高可以达到 3 K。另外,短波的分布范围远比长波的分布范围广,以赤道地区的重力波扰动为例,长

波的扰动范围基本集中在 10°S—10°N, 而短波在 20°S—20°N 的范围内都存在较强的扰动。

通过上述分析可以发现,重力波扰动强度随高度的增加而逐渐增强,春秋两季的重力波扰动强度相对夏冬两季较弱,并且随着纬度的增加重力波扰动强度逐渐减弱;夏冬两季的重力波扰动除了在赤道附近存在明显的强扰动带,并且冬季半球的重力波扰动强度也会明显强于夏季半球的重力波扰动强度,这与 Zhang 等^[9]以及 Xiao 等^[22]的发现类似;重力波的扰动强度还会受到地形分布的影响,一般来说,陆洋交界区域的重力波扰动强度会强于同纬度其他区域的强度;除此之外,还可以发现,短波重力波扰动强度要明显强于长波重力波扰动,这说明在 20~50 km 高度范围内,重力波波长主要集中在 2~10 km 波长范围内,这可能是由于风云的载荷对于短波更加敏感造成的。具体原因还需要做更加深入的分析研究。

2.2 纬圈平均的重力波活动强度随高度的变化

利用 2015—2019 年 5 年之间 FY-3C 卫星的观测数据,对不同季节的纬圈平均扰动随高度和纬度的变化进行分析(见图 10),第一行描述的是垂直波长为 2~20 km 的重力波扰动分布特征,第二行,第三行分别描述的是垂直波长在 2~10 km, 12~20 km 的

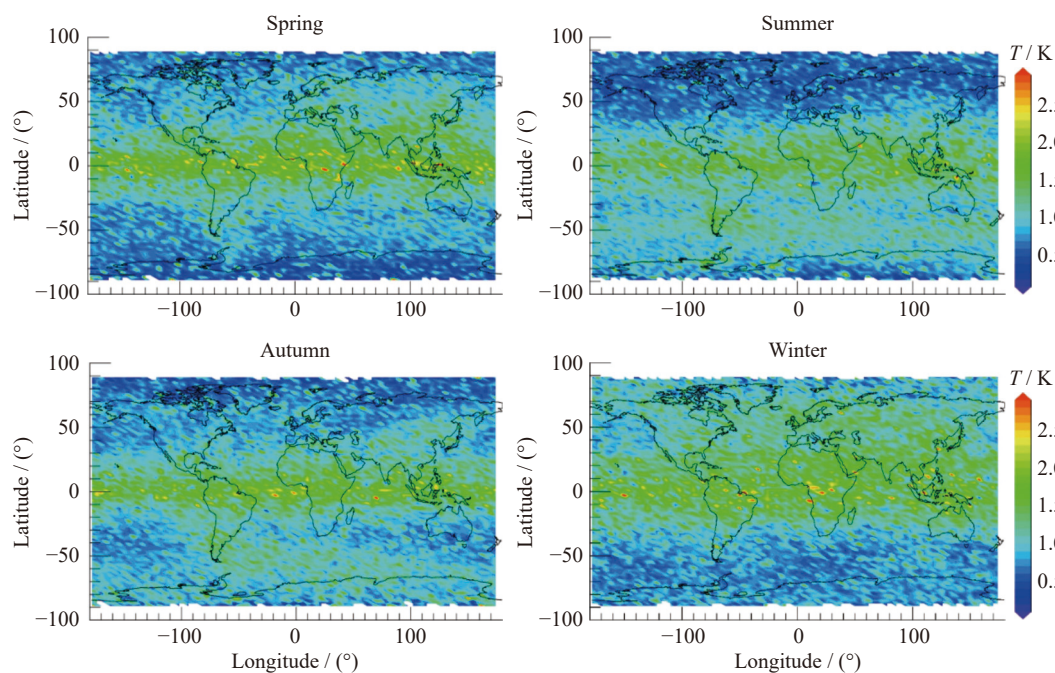


图 7 2015—2019 年 FY-3C 卫星观测数据分析的不同季节 25 km 高度层全球重力波短波扰动强度分布
Fig. 7 Distribution of global gravity wave disturbance intensity at 25 km altitude in different seasons
based on analysis of FY-3C observation data from 2015 to 2019

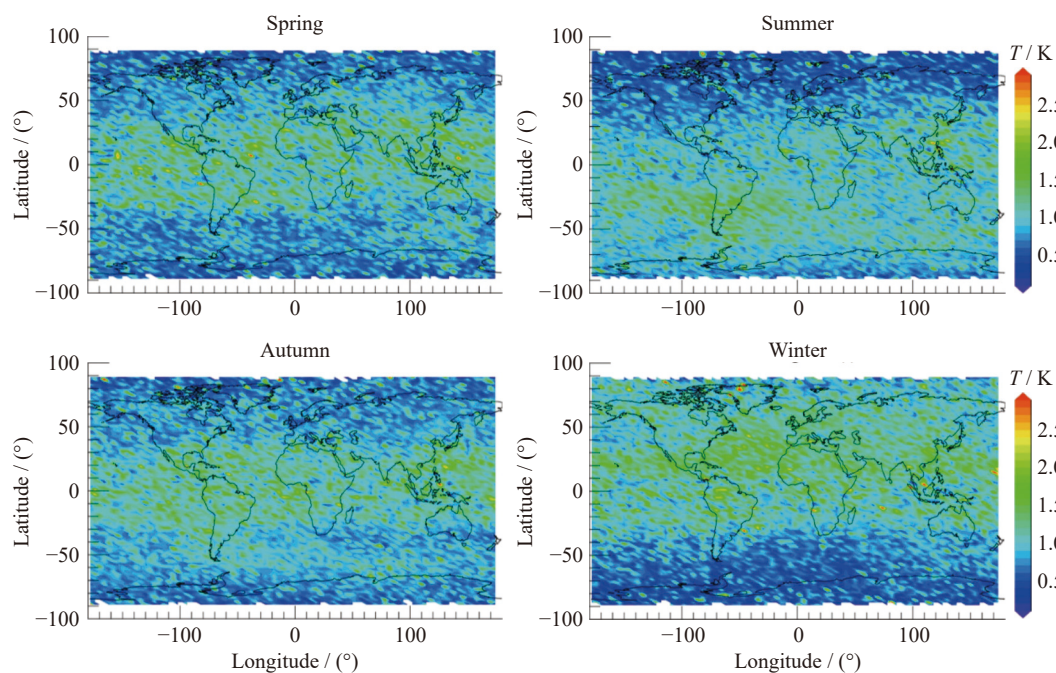


图 8 2015—2019 年 FY-3C 卫星观测数据分析的不同季节 35 km 高度层全球重力波短波扰动强度分布
Fig. 8 Distribution of global gravity wave disturbance intensity at 35 km altitude in different seasons
based on analysis of FY-3C observation data from 2015 to 2019

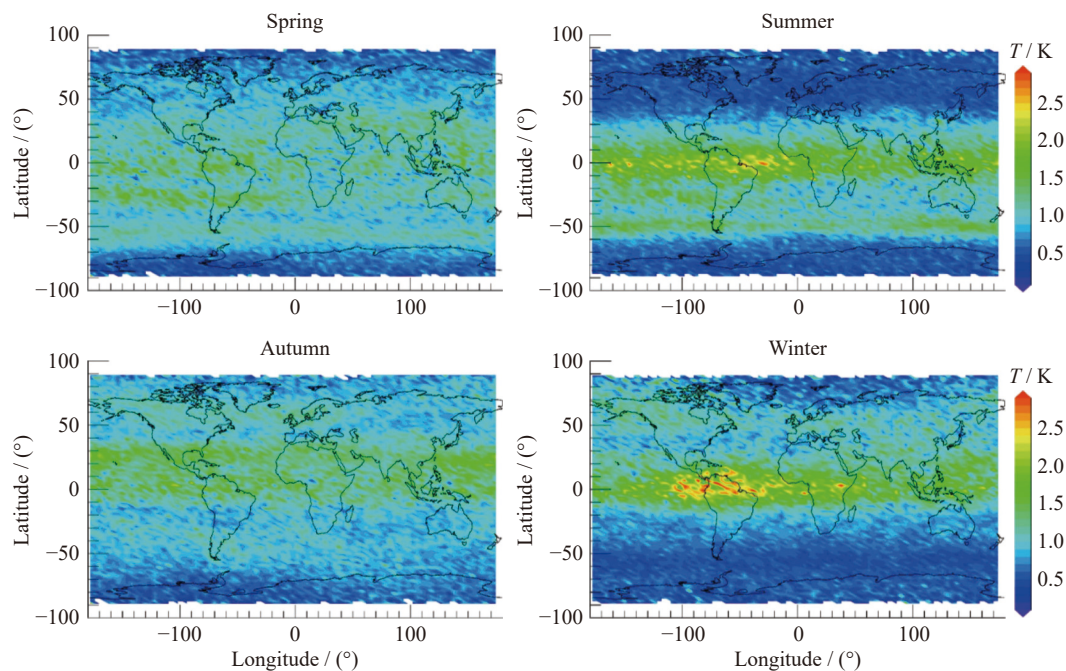


图 9 2015—2019 年 FY-3C 卫星观测数据分析的不同季节的 45 km 高度层全球重力波短波扰动强度分布情况
Fig. 9 Distribution of global gravity wave disturbance intensity at 45 km altitude in different seasons
based on analysis of FY-3C observation data from 2015 to 2019

重力波扰动分布特征。

重力波扰动强度在高度上存在三个扰动带, 分别

在 25 km 左右、35 km 左右以及 45 km 左右, 这与 Alexander 等^[6] 和 Wu 等^[7] 所得结果有所差异, 这主

要是因为三个扰动带主要体现在长波重力波分布上, 而 Alexander 等^[6]和 Wu 等^[7]所分析的重力波均以短波为主; 在季节变化上, 春秋两季的重力波扰动主要集中在赤道和低纬地区($30^{\circ}\text{S}-30^{\circ}\text{N}$), 夏季则主要集中在赤道区域(南北纬 $20^{\circ}\text{S}-20^{\circ}\text{N}$)以及南半球中纬度地区($40^{\circ}\text{S}-60^{\circ}\text{S}$), 冬季则与夏季相反, 重力波扰动主要集中在赤道区域以及北半球中纬度地区。重力波在纬度上的分布趋势与 Alexander 等^[6]和 Wu 等^[7]所得结果一致。

重力波短波扰动分布特征和长波扰动分布特征分别如图 10 第二行和图 10 第三行所示。长波扰动分布特征与全谱(波长范围为 $2\sim 20\text{ km}$)的重力波扰动具有相似的特征, 只是扰动值较小, 纬圈的扰动值最大在 2 K 以下, 而全谱的重力波扰动值最大可达 4 K 以上。短波扰动分布随高度的变化并不明显, 纬度上主要分布在赤道地区($20^{\circ}\text{S}-20^{\circ}\text{N}$), 另外在夏季南半球高纬度地区以及冬季北半球高纬度地区均有

较强的短波扰动存在。短波扰动在赤道地区的值大致在 3 K , 冬季半球中高纬度地区的扰动值略小于赤道地区, 但是强于夏季半球中高纬度地区的扰动值。

2.3 重力波扰动强度随时间分布特征

将全球的重力波扰动分布分为 5 个纬度带(南北半球高纬地区、中纬度地区和赤道区域)和 3 个高度层($20\sim 30\text{ km}$, $30\sim 40\text{ km}$, $40\sim 50\text{ km}$), 并按照时间顺序进行排列。图 11 给出了南北半球高纬度地区重力波平均扰动随时间变化的曲线。可以看到, 高纬度地区重力波扰动存在明显 1 年周期变化, 北半球高纬地区各个高度层的重力波扰动在每年的 1 月左右达到峰值, 在 7 月左右为最低值。而南半球高纬地区各个高度层的重力波扰动在每年的 7 月最大, 1 月最小。此外, 还可以看到, 在 2016 年存在一个重力波活动高年, 期间重力波扰动的峰值最高, 2017—2019 年重力波活动大致呈逐年减弱的趋势。

从中纬度地区和赤道地区上空平均重力波扰

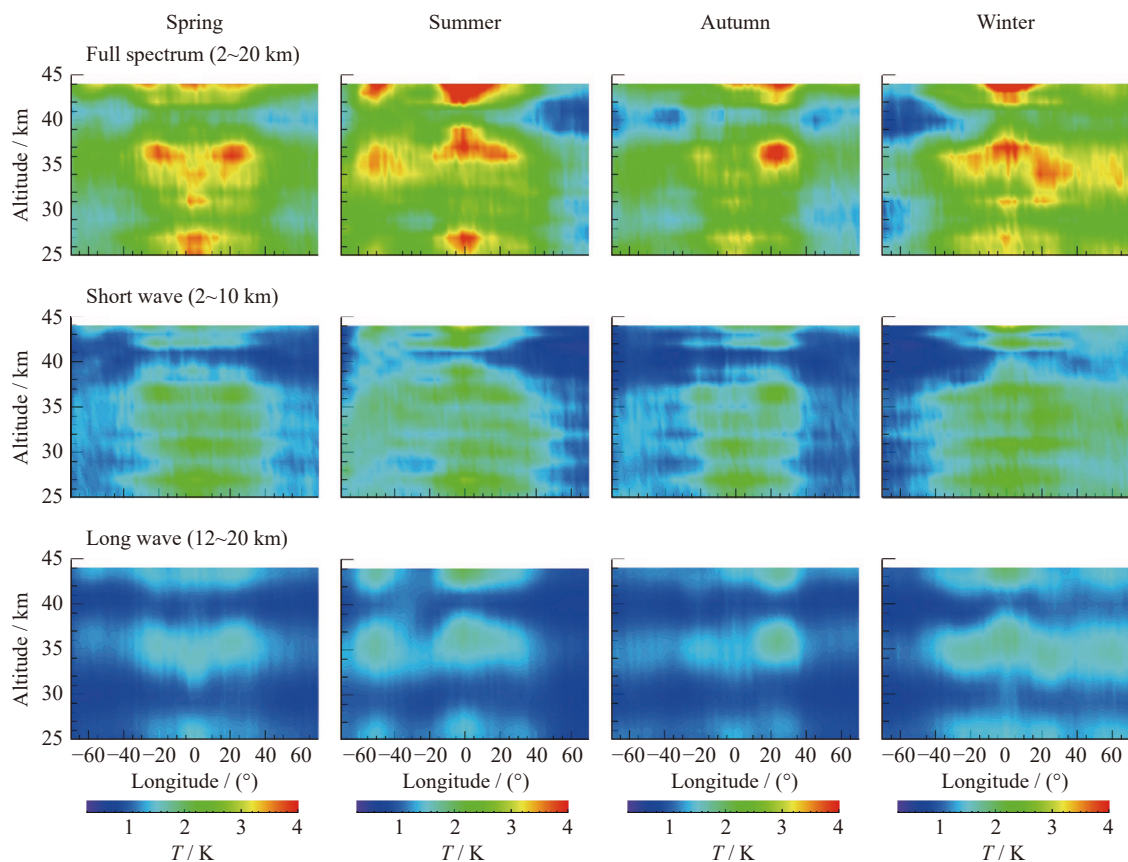


图 10 2015—2019 年 FY-3C 卫星观测数据分析的纬圈平均扰动随高度和纬度的变化

Fig. 10 Latitudinal mean perturbation with altitude and latitude based on analysis of FY-3C observation data from 2015 to 2019

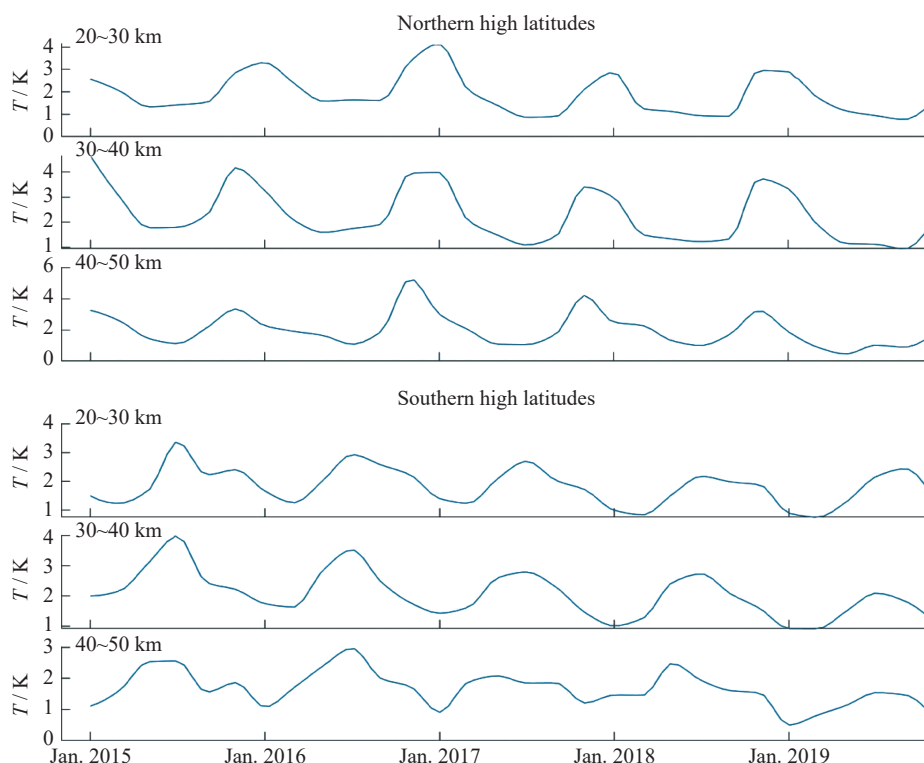


图 11 平均重力波扰动在南北半球高纬度地区的变化

Fig. 11 Variations of mean gravity wave perturbations at high latitudes in both hemispheres

动强度随时间的变化曲线(见图 12)中可以看出,中纬度地区各高度层的重力波扰动随时间的变化特征相对于高纬度地区要复杂,不再是单一的年变化特征。例如在赤道地区,尤其在 30 km 以上的高度,重力波扰动可以看到明显的半年周期变化,在每年的 1 月和 7 月均有一个扰动的极大值。另外,相比于高纬度地区,2017—2019 年重力波活动的减弱趋势似乎更加明显。但是在 2017 年秋季的北半球中纬度地区以及 2018 年秋季南半球中纬度地区重力波活动呈突然增强的趋势,而赤道地区 20~30 km 高度层 2017—2018 年的重力波活动异常低。

3 结论

通过使用不同卫星的数据对重力波的全球分布研究不断深入,Jin 等^[14]利用两年多的 FY-3C 气象卫星 GNSS 掩星 Level 1 数据,自主反演了大气温度,并采用巴特沃斯滤波器分析了平流层重力波的全球分布特征。其研究结果同样表明,赤道地区频繁的强对流天气的存在,导致了该地区的强重力波活动。Guo 等^[23]利用 2012—2014 年的高光谱红外卫星探测

资料(AIRS)分析了平流层全球重力波活动。与本文研究结果不同的是,在冬夏两季高纬度地区重力波扰动强度要明显强于赤道地区。这是由于,AIRS 主要对垂直波长大于 20 km 的重力波敏感^[24],而本文提取的重力波垂直波长主要集中在 2~20 km 范围内。高纬度地区冬季没有零风层的存在,地形激发的重力波能够上传至平流层高度,导致高纬度地区冬季的强重力波扰动现象。由此可见,地形激发的重力波具有较长的垂直波长,而以大气对流作为主要激发源的赤道地区重力波则以短波为主。

本文利用中国自主研制的 FY-3C/GNOS 的射电掩星数据进行全球重力波分布和变化特征的分析,使用 2015—2019 年 5 年间的的海数据获得了全球重力波分布的年际变化特征。首先利用 GONS 的大气温度廓线数据提取出大气重力波扰动参数,分析了 2015—2019 年这 5 年之间大气重力波扰动全球分布的变化,给出了大气重力波扰动全球纬圈平均的分布特征。通过奈奎斯特带通滤波的方法,分析了长波重力波(12~20 km)和短波重力波(2~10 km)全球分布的特点和变化特征。可以得出如下结论。

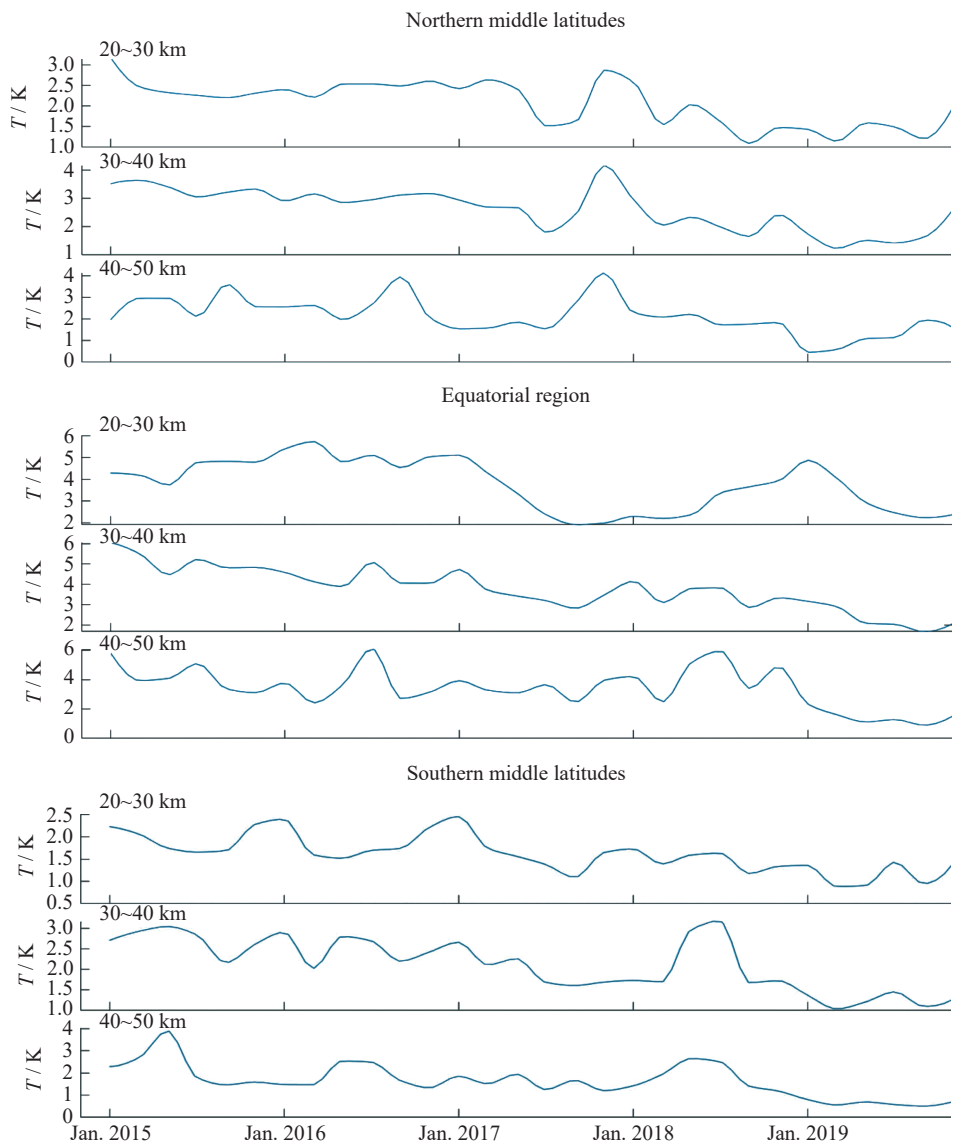


图 12 中纬度地区和赤道地区在不同高度上的平均重力波扰动强度

Fig. 12 Variations of mean gravity wave perturbations at different altitudes in mid-latitude and equatorial regions

- (1)GNOS 探测到的大气重力波的垂直波长以短波长(2~10 km)为主。
- (2)大气重力波扰动强度随着高度增加而逐渐增强,重力波扰动呈现冬季强夏季弱的现象,赤道地区存在很强的重力波活动。
- (3)高纬地区重力波活动随时间主要呈现年周期变化特征,中纬度及赤道地区除年变化外,还存在半年周期等更多的周期性变化。
- (4)GNOS 探测到的大气重力波在 2017 年之后有逐年减小的趋势,尤其在高纬度地区更加明显;2017 年秋季北半球中纬度地区以及 2018 年秋季南半

球中纬度地区重力波活动突然增强。这些变化特征的具体原因还有待进一步研究。

参考文献

[1] ALLEN S J, VINCENT R A. Gravity wave activity in the lower atmosphere: seasonal and latitudinal variations[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1995, **100**(D1): 1327-1350

[2] FRITTS D C, ALEXANDER M J. Gravity wave dynamics and effects in the middle atmosphere[J]. *Reviews of Geophysics*, 2012, **50**(3): RG3004-1

[3] LYU Daren, CHEN Zeyu, GUO Xia, *et al.* Recent progress in near space atmospheric environment study[J]. *Ad-*

- vances in Mechanics*, 2009, **39**(6): 674-682 (吕达仁, 陈泽宇, 郭霞, 等. 临近空间大气环境研究现状[J]. *力学进展*, 2009, **39**(6): 674-682)
- [4] XU Kai, YAO Zhigang, HAN Zhigang, *et al.* Recent process in near-space gravity wave analysis based on satellite measurements[J]. *Advances in Earth Science*, 2017, **32**(1): 66-74 (徐凯, 姚志刚, 韩志刚, 等. 临近空间重力波强扰动的卫星观测研究进展[J]. *地球科学进展*, 2017, **32**(1): 66-74)
 - [5] WU D L, PREUSSE P, ECKERMANN S D, *et al.* Remote sounding of atmospheric gravity waves with satellite limb and nadir techniques[J]. *Advances in Space Research*, 2006, **37**(12): 2269-2277
 - [6] ALEXANDER M J, GILLE J, CAVANAUGH C, *et al.* Global estimates of gravity wave momentum flux from High Resolution Dynamics Limb Sounder observations[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2008, **113**(D15): D15S18
 - [7] WU D L, ECKERMANN S D. Global gravity wave variances from Aura MLS: characteristics and interpretation [J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2008, **65**(12): 3695-3718
 - [8] PREUSSE P, ECKERMANN S D, ERN M, *et al.* Global ray tracing simulations of the SABER gravity wave climatology[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2009, **114**(D8): D08126
 - [9] ZHANG Yun, XIONG Jiangang, WAN Weixing. Analysis on the global morphology of middle atmospheric gravity waves[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2011, **54**(7): 1711-1717 (张云, 熊建刚, 万卫星. 中层大气重力波的全球分布特征[J]. *地球物理学报*, 2011, **54**(7): 1711-1717)
 - [10] HOFFMANN L, XUE X, ALEXANDER M J. A global view of stratospheric gravity wave hotspots located with Atmospheric Infrared Sounder observations[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2013, **118**(2): 416-434
 - [11] LIU X, YUE J, XU J Y, *et al.* Gravity wave variations in the polar stratosphere and mesosphere from SOFIE/AIM temperature observations[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2014, **119**(12): 7368-7381
 - [12] MILLER S D, STRAKA W C, YUE J, *et al.* Upper atmospheric gravity wave details revealed in nightglow satellite imagery[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2015, **112**(49): E6728-E6735
 - [13] YAO Zhigang, SUN Rui, ZHAO Zengliang, *et al.* Gravity waves in the near space observed by the microwave temperature sounder of the FY-3C meteorology satellite[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2019, **62**(2): 473-488 (姚志刚, 孙睿, 赵增亮, 等. 风云三号卫星微波观测的临近空间大气扰动特征[J]. *地球物理学报*, 2019, **62**(2): 473-488)
 - [14] 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 & Technology (Natural Science Edition)*, 2020, **12**(1): 57-67 (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)
 - [15] SUN Y Q, BAI W H, LIU C L, *et al.* The FengYun-3 C radio occultation sounder GNOS: a review of the mission and its early results and science applications[J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2018, **11**(10): 5797-5811
 - [16] LIAO M, ZHANG P, YANG G L, *et al.* Preliminary validation of the refractivity from the new radio occultation sounder GNOS/FY-3C[J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2016, **9**(2): 781-792
 - [17] LIU Z Y, SUN Y Q, BAI W H, *et al.* Validation of preliminary results of thermal tropopause derived from FY-3 C GNOS data[J]. *Remote Sensing*, 2019, **11**(9): 1139
 - [18] LINDZEN R S. Turbulence and stress owing to gravity wave and tidal breakdown[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 1981, **86**(C10): 9707-9714
 - [19] CHEN Cao. The Preliminary Studies on the Gravity Waves of Mid-atmosphere Through Rayleigh Lidar Techniques[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2010 (陈操. 中层大气重力波的瑞利激光雷达初步研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2010)
 - [20] XIAO Cunying. Researches on the Dynamics of the Atmosphere in the Near Space[D]. Beijing: Graduate University of Chinese Academy of Sciences (Center for Space Science and Applied Research), 2009 (肖存英. 临近空间大气动力学特性研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院(空间科学与应用研究中心), 2009)
 - [21] CHEN Zeyu, LYU Daren. Characteristics of the stratospheric travelling planetary waves revealed by using satellite data[J]. *Advances in Earth Science*, 2009, **24**(3): 320-330 (陈泽宇, 吕达仁. 利用卫星数据考察平流层传播性行星波活动特征[J]. *地球科学进展*, 2009, **24**(3): 320-330)
 - [22] XIAO Cunying, HU Xiong, WANG Bo, *et al.* Quantitative studies on the variations of near space atmospheric fluctuation[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2016, **59**(4): 1211-1221 (肖存英, 胡雄, 王博, 等. 临近空间大气扰动变化特性的定量研究[J]. *地球物理学报*, 2016, **59**(4): 1211-1221)
 - [23] GUO Wenjie, YAO Zhigang, YANG Junfeng, *et al.* Research on global stratospheric gravity wave characteristics by AIRS observation data[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2021, **41**(4): 609-616 (郭文杰, 姚志刚, 杨钧烽, 等. AIRS观测资料研究全球平流层重力波特性[J]. *空间科学学报*, 2021, **41**(4): 609-616)
 - [24] YUE J, HOFFMANN L, ALEXANDER M J. Simultaneous observations of convective gravity waves from a ground-based airglow imager and the AIRS satellite experiment[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2013, **118**(8): 3178-3191