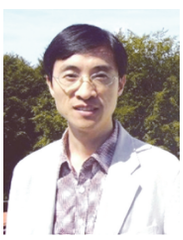
DOI:10.13878/j.cnki.jnuist.2020.01.008

金双根[1,2]　高超[2,3]　李君海[2]

利用 FY-3C 气象卫星 GNSS 掩星估计全球重力波变化与分析



作者简介:金双根(1974—),男,籍贯安徽,博士,欧洲科学院院士,欧洲人文与自然科学院院士,俄罗斯自然科学院外籍院士,国际大地测量与地球物理学联合会(IUGG)会士,国际大地测量协会(IAG)会士,中科院"百人计划",江苏省"特聘教授",南京信息工程大学教授、院长,中科院上海天文台研究员,博士生导师.长期从事卫星导航、卫星遥感、大地测量和空间行星探测及应用等领域的研究工作,发表 SCI 论文 200 余篇,EI 论文 100 余篇,出版专著和教科书 8 部,获国家发明专利和软件著作权 10 项.
E-mail:sgjin@ nuist.edu.cn;
sg.jin@ yahoo.com

收稿日期 2019-07-01
基金项目 国家自然科学基金(11573052);国家自然科学基金委-德国科学基金会合作项目(41761134092);江苏省特聘教授项目(R2018T20);南京信息工程大学人才启动经费(2243141801036)

1 南京信息工程大学 遥感与测绘工程学院,南京,210044
2 中国科学院上海天文台,上海,200030
3 中国科学院大学,北京,100049

摘要

大气重力波是地球大气层中广泛存在的重要大气动力学扰动,研究其分布和变化规律对理解大气物理、大气结构以及大气动力学等具有重要意义.传统大气重力波探测手段,如雷达和探空气球等,均存在探测时间短、有效探测高度低等缺点,全球卫星导航系统(GNSS)掩星观测具有全天候、低成本、高精度等优点,被广泛应用于地球大气探测和研究,为研究区域或全球重力波变化和活动特征提供了新的观测手段.本文利用中国第一颗搭载 GNSS 掩星设备气象卫星——风云 3C(FY-3C)获得的掩星数据,反演得到 2014 年 8 月—2016 年 12 月大气温度轮廓线,并首次估计重力波参数分布,分析了重力波参数的时空变化分布特征.结果表明,海陆季节性对流导致冬夏两季的重力波势能强于春秋两季,赤道对流作用导致赤道区域重力波强于两极,夏季南半球中低纬度地区重力波活动频繁,冬季北半球中低纬度区域重力波活动频繁.重力波随着高度的上升,势能逐渐下降.另外,地形是低层大气重力波的主要来源.

关键词

GNSS 掩星;大气重力波;FY-3C 卫星

中图分类号 P227
文献标志码 A

0　引言

大气重力波是一种中小尺度的波动现象,广泛存在于大气层,其垂直波长在 2~10 km 左右,而水平波长可以从几千米到几万米[1].由于大气中的微小气团在大气稳定的层结构中产生扰动,微小气团在浮力与重力的作用下上下波动的现象具有波的特性,所以称之为重力波[2].不同成因与来源的重力波具有不同的波数、能量密度、传播方向及耗散机制.重力波可以携带动量和能量在大气层中传播耗散使大气动量、能量重新分配.重力波还可以影响大尺度气候变化,如低层大气扰动产生的重力波可以向上传播至中高层大气,破碎后影响大气大尺度环流和大气热学结构,导致晴空湍流,对航天器的飞行产生不良影响;大气重力波在中间层和低热层发生破碎耗散,会造成中层顶温度异常.此外,Ern 等[3]使用卫星手段分析了重力波和准两年振荡(QBO,Quasi-Biennial Oscillation)的关系,描述了重力波在赤道 QBO 变化过程中的作用,提出了对重力波的进一步了解对于提高大气模

型中 QBO 的准确性至关重要;Vincent 和 Alexander 提到重力波还能进一步向上传播影响电离层,导致行进式电离层扰动 (TIDs),对通信及导航产生影响[4].因此,分析重力波的时空分布特征、能量变化以及波源成因等对于大气科学的研究具有重要意义.

随着大气探测技术的发展,对重力波理论理解的深入以及计算机计算能力的提高,越来越多的重力波相关研究成果被发表.现今常用的重力波探测手段有激光雷达、火箭探空仪、探空气球、无线电探空仪和卫星探测等.各种探测方法都有其优势和局限性,如激光雷达可以探测平流层及中间层底部的温度密度,但是大多数激光雷达只能在夜晚工作,而且激光雷达的测站相对较少,不足以研究全球范围内的重力波活动信息;探空仪可以直接携带温度湿度等测量设备升入天空直接对气象元素进行测量,测量的结果较遥感的方法可信度更高,但是每天只能测量两次,探测器的升空高度大约 25 km,而且测站也不是很多,对于研究全球范围内的重力波信息数据密度明显不足.

相比之下,利用卫星遥感测量的方式可以更好地获得大气背景动力学结构、全球尺度的大气扰动和中尺度的大气扰动.Torre 等[5]首次使用 GPS 无线电掩星数据获得了全球重力波活动分布;Tsuda 等[6]利用 DAWEX 实验期间的探空雷达温度数据获得的重力波垂直波长数据与通过 GPS 掩星温度数据计算所得的重力波垂直波长数据做对比,具有良好的符合度;Wang 和 Alexander 通过 COSMIC 掩星数据使用小波变换的方法获得了全球重力波参数[7];Faber 等[2]使用 COSMIC 三个邻近的掩星温度剖面数据获取了重力波横波的全球分布,确定了重力波横波的水平动量等.

GNSS 掩星测量技术已经发展并应用了数十年,随着科学研究需求的不断增加和细化,对 GNSS 掩星测量技术的精度要求也越来越高,很多新的反演手段已经被应用于 GNSS 掩星数据反演,如正则变换(CT)法和全谱反演(FSI)法可以避免多路径效应或者是对流层下部水汽干扰,但是对于电离层所带来的误差,往往只能使用双频 GPS 组合的方法来消弱,但这种方法仍然存在电离层残存误差,因为双频组合的方法只能消除电离层的一阶项误差.这个电离层残存误差对于掩星 Level-1 相位数据的影响可达数厘米[8].对于温度剖面反演的影响还需要进一步的研究,提出合适的方法来消除或者消弱电离层延迟,可以提高 GNSS 掩星温度剖面反演的精度,这对于进一步提高重力波参数估计精度十分重要.

当前 GNSS 掩星卫星主要是由美国和中国台湾发射的 COSMIC 卫星星座、德国发射的 CHAMP 低轨卫星和美国 NASA 发射的 GRACE 卫星,但掩星数据仍然有限.随着后续 COSMIC-2 卫星和中国低轨卫星,如中国 FY-3C 气象卫星,或提供更多 GNSS 掩星观测.本文首次利用中国 FY-3C 气象卫星获得的 2014 年 8 月—2016 年 12 月的掩星数据,反演得到大气温度轮廓线,进而获得全球重力波分布情况以及季节变化特征.

1 观测数据和重力波估计方法

1.1 FY-3C 掩星数据

中国风云气象卫星 3C(FY-3C)发射于 2013 年 9 月 23 日,是中国第二代极轨气象卫星.该卫星搭载了多种探测器,如空间环境检测器、太阳辐射探测器、地球辐射探测器、微波辐射计、微波温度计、红外分光计、GNSS 掩星探测仪等,大幅度提高了我国对全球气象资料的获取能力,能够获取全球、全天候、定量、三维的大气数据.FY-3C 上搭载的掩星接收机 GNOS(GNSS Occultation Sounder)是我国首台卫星掩星接收机,可以同时接收 GPS 和 Beidou 卫星导航信号用以掩星观测.GNOS 掩星接收机搭载了最新的 Open-loop 技术,在中性大气掩星探测中可以达到 100 Hz,跟踪的信号可至地面 1~2 km 处[9].FY-3C 每天可以获得 500 次 GPS 掩星事件和 200 次 BDS 掩星事件,掩星数据自 2014 年 8 月开始发布,可以从风云气象卫星官网(http://satellite.nsmc.org.cn)获取.本文选取了 2014 年 8 月—2016 年 12 月共计 29 个月的 FY-3C 中性大气掩星数据,共计 34 万条掩星 Level-1 级相位延迟数据,采用 ROPP 软件进行掩星反演获得大气温度轮廓线,进而提取全球重力波参数并进行分析.

1.2 重力波估计原理

大气重力波是一种重要的大气波动现象,是由微小气团在重力与浮力的共同作用下在平衡位置上下振荡产生的.我们可以通过云层的变化和卷积来直观地观察重力波的形式和运动状态,也可以通过大气参数,如温度或密度的扰动来间接地获得重力波的形式和运动状态.为了更科学地研究大气重力波的特征、运动及机理,必须量化大气重力波的相关

参数.Fritts 和 Vanzandt 提出了一种重力波参数化的方案,给出了总能量谱 $E(\mu,\omega,\varphi)$、垂直波数 m、固有频率 ω 与方位角 φ 的定义,并进一步给出了它们之间的关系[10].

实际情况下重力波的影响是很复杂的,其中包含着波-波之间的影响[11].但是在研究领域上,对于重力波理论的研究常常都是在线性理论的基础上进行的,因为线性理论比非线性理论更加简洁易懂,而且计算方便.相关研究结论已经表明,在线性理论的框架下分析重力波是合理的,波-波作用几乎可以忽略不计[12].在线性理论下,我们只考虑一阶小量,认为得到的温度或者风速轮廓线是由背景温度场或背景风场和扰动温度或者扰动风场组合而成的,即:

$$T = \bar{T} + T' , \tag{1}$$

$$u = \bar{u} + u', \quad v = \bar{v} + v', \quad w = \bar{w} + w', \tag{2}$$

式中 T 为温度轮廓线,u、v、w 为风场的三个分量,$\bar{x}$ 表示背景温度场或者背景风场,x' 表示扰动温度或者扰动风场.

利用掩星获得的温度轮廓线可以提取重力波参数[13].为了能准确有效地获取大气重力波参数,准确的重力波扰动温度轮廓线十分重要.很多学者提出了不同的滤波方法来获取重力波扰动温度轮廓线.如果将扰动温度视为噪声,可以使用二次或者是三次多项式拟合来获取重力波扰动温度剖面[4];如果认为重力波的垂直波长在 2~10 km,可以采用高通滤波器过滤掉波长高于 10 km 的成分,来获得背景温度轮廓线[14].Torre 等[5]使用带通滤波器获取重力波温度扰动轮廓线.还有一些其他的滤波方法也可以用于获取扰动温度轮廓线,如插值滤波、高斯平滑、巴特沃斯滤波等.也有学者认为 Kelvin 波、行星波与重力波的波长大致相同,普通的滤波器滤波无法完全消除,所以提出了使用 S-变换进行经向滤波来消除其他波的影响[15].Faber 等[2]提出使用连续小波变换(CWT)的方法获取扰动温度轮廓线,剔除 Kelvin 波与行星波的影响.针对处理步骤,也有学者提出了一些改进措施,比如对对流层上下的温度轮廓线分别滤波以防止对流层顶温度突变对滤波产生的影响[16].

由大气重力波的本质可知,大气重力波是微小气团在重力与浮力的共同作用下往复振荡所形成的,这个振荡频率称为浮力频率(Brumt-Vaisala 频率):

$$N_z^2 = \frac{g}{\bar{T}}\left(\frac{\partial \bar{T}}{\partial z} + \frac{g}{c_p}\right) , \tag{3}$$

式中 N_z 为浮力频率,g 为重力加速度,$\bar{T}$ 为背景温度场,c_p 为等压热容.重力波的势能可以描述为

$$E_p(z) = \frac{1}{2}\left(\frac{g}{N_z}\right)^2\left(\frac{T'}{\bar{T}}\right)^2 , \tag{4}$$

式中 E_p 为重力波势能,T' 为重力波扰动温度.关于 T'^2 的处理方式,本文按照 Tsuda 等[14]中提到的方式,以 2 km 为窗口,200 m 为步长,计算窗口内的平滑值:

$$T'^2 = \frac{1}{z_2 - z_1}\int_{z_1}^{z_2} T(z)'^2 \mathrm{d}z . \tag{5}$$

重力波的动能可以从风场中获得:

$$E_k = \frac{1}{2}(\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2}) . \tag{6}$$

重力波的总能量可以表示为

$$E_0 = E_k + E_p . \tag{7}$$

使用 S-变换可以提取重力波的垂直波数 m,通过 S-变换可以获得所需高度范围内的所有数据点上的重力波垂直波长 λ_k,然后利用 S- 变换中对应数据点的幅度值 A_k 对高度范围内的垂直波长 λ_k 做加权平均,即可得到所需高度范围内的重力波垂直波长平均值 λ[15],即:

$$\lambda = \sum_{k=1}^{n} A_k\lambda_k / \sum_{k=1}^{n} A_k . \tag{8}$$

而垂直波数 m 可以通过式(9) 获得:

$$m = 2\pi/\lambda . \tag{9}$$

水平波数提取的方法源自 Ern 等[3]处理 CRISTA 数据所提出的方法,根据相邻温度轮廓线的相位差和相邻轮廓线的距离来获得水平波长:

$$k_h = \Delta\phi_{ij}/\Delta r_{ij} . \tag{10}$$

Faber 等[2]提出了针对于掩星数据获得水平重力波的三角配对原则,即时间范围在 2 h 以内,经纬差在 15°范围内.配对后即可使用式(10)获取重力波的水平波长.

1.3 滤波方法

重力波的能量在大气中传播会造成背景温度的扰动,所以通过探测温度的扰动就可以获得重力波的相关参数.获取温度扰动的关键是获取背景温度场,而获得背景温度场的方法就是从中去掉温度扰动的部分.一些学者提议采用曲线拟合的方法,拟合出平滑的温度轮廓线作为背景温度场[4];还有些学者认为重力波的波长范围是 2~10 km,建议采用滤波器的方法提取这部分波长,如巴特沃斯滤波、S-变换滤波、连续小波变化(CWT)滤波等.

本文选择了 2014 年 8 月—2016 年 12 月中国气象卫星 FY-3C 提供的掩星数据,使用巴特沃斯滤波器进行频率域滤波.巴特沃斯滤波器是由英国工程师 Stephen Butterworth 提出的,其最明显的特点是通频带内的频率响应最为平坦,能够最大程度上保留通带内的信号波形[17].具体采用的是六阶巴特沃斯滤波器带通滤波来获取扰动温度轮廓线.从图 1 可以发现,因为巴特沃斯滤波器采用的是软阈值,所以在滤波后的波谱图中,有效地过滤掉了温度轮廓线中波长大于 10 km 的成分,因此巴特沃斯滤波器也可以应用于重力波参数估算中扰动温度的提取.

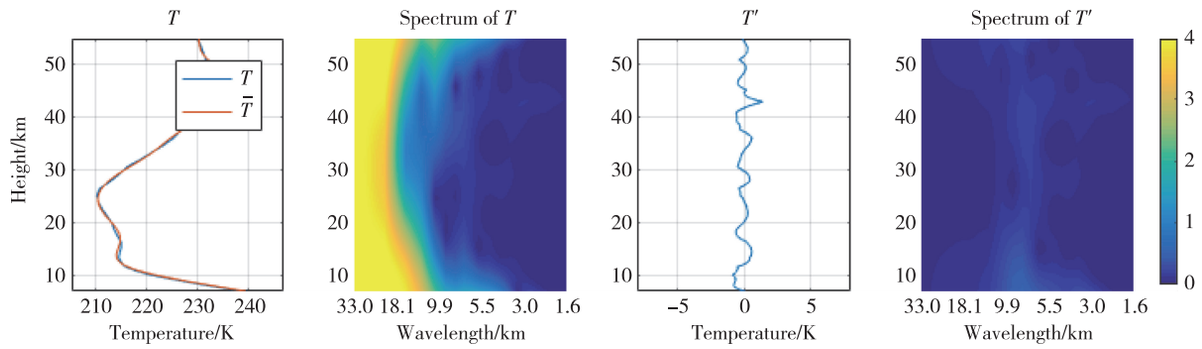


图 1　采用六阶巴特沃斯滤波器获得的温度扰动曲线波谱能量

Fig. 1　Spectral energy spectrum of temperature disturbance curve obtained by sixth-order Butterworth filter

2　结果与分析

2.1　全球重力波估计

综合考虑到 FY-3C 掩星数据的数据量和数据分布以及重力波获取的时空分辨率,本文将地球以 2° Lat/4°Lon 的空间分辨率、1 个月的时间分辨率格网化成 90×90×1 个月的格网点,在格网点内将温度轮廓线以垂直 200 m 的分辨率插值并取平均,作为该格网点的温度轮廓线.

在格网化 FY-3C 温度轮廓线数据之前,本文对其进行了数据预处理.数据预处理的原则是剔除掉温度大于 450 K 或者小于 150 K 的轮廓线,以及最低高度大于 8 km 或最大高度小于 34 km 的温度廓线.之后与 ECMWF 公布的温度再分析数据进行比较验证,剔除掉与 ECMWF 温度再分析数据差值大于 25 K 的轮廓线.经过数据预处理后,FY-3C 数据的有效性约为 99.8%.

本文先对每一条纬线圈的每一个高度做 S-变换,提取波数为 0~6 的成分以去掉一些纬向的扰动对提取重力波参数的干扰,如行星波.采用的分离背景温度场和扰动温度场的方法是连续小波变换后,使用巴特沃斯滤波器,设定截取频率为[0.1×10^3, 0.5×10^3](单位:MHz)进行带通滤波后,经逆变换作为背景温度场.然后如 1.2 节所述的方法求得大气重力波的各个参数.

图 2 和图 3 分别为 FY-3C 掩星数据获得的 2015 年北半球冬季(文中提到的季节如无说明均为北半球季节.春季:3—5 月;夏季:6—8 月;秋季:9—11 月;冬季:12 月—次年 2 月)重力波势能和垂直波长的全球分布,图中的白块是由于 FY-3C 掩星数据不足造成的信息缺失.在势能分布中,赤道附近的重力波势能平均值在 10 J/kg 左右,由赤道向两极逐渐递减,且北半球的重力波势能强于南半球,亚欧大陆上空的重力波势能相对较高,这些特点也满足重力波的激发机制,如地形、风切变等.在垂直波长分布上,赤道上空的垂直波长在 5 km 左右,在南北纬 30°左

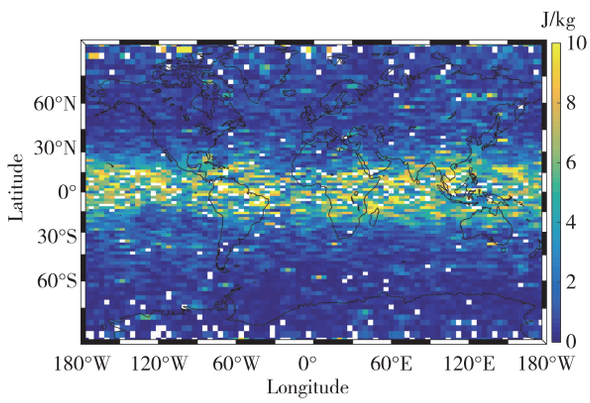


图 2　FY-3C 掩星数据获取的 2015 年北半球冬季高度为 20~30 km 重力波势能全球分布

Fig. 2　Global distribution of gravity wave potential energy from FY-3C radio occultation data at the height of 20−30 km in the northern hemisphere winter,2015

右达到最大值,最大值约 10 km,这也与前人的研究结果类似[2,15].在重力波研究中,由于采用不同的滤波方法或者选取的格网密度不同,获得的重力波参数会略有不同,同时也无法判断获取的重力波参数的准确性,因此在当前研究中往往比较的是重力波参数的时空分布.

综上所述,我国 FY-3C 气象卫星的掩星数据在重力波探测上也具有应用价值.而且本文将以往研究的空间分辨率进一步提高,有利于更加细致地分析重力波的时空分布规律.

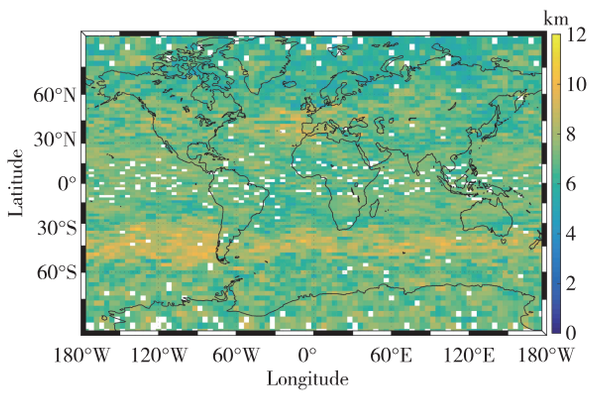


图 3 FY-3C 掩星数据获取的 2015 年北半球冬季高度为 20~30 km 重力波垂直波长全球分布

Fig. 3 Global distribution of gravity wave vertical wavelength from FY-3C radio occultation data at the height of 20-30 km in the northern hemisphere winter,2015

2.2 全球重力波参数季节分布规律及成因

图 4 显示了 15~20 km 高度上重力波势能的季节性全球分布.在图 4 中,重力波势能的高值基本上分布在赤道附近,并向两极递减,这可能与赤道附近的对流有关;另外,东半球(0°~180°E)的重力波势能较西半球更加明显,这可能与东半球亚欧大陆的陆地面积更大有关;同时,还发现夏季北半球的落基山脉西侧的海洋上空、亚欧大陆的青藏高原喜马拉雅山脉北侧、冬季南半球的安第斯山脉西侧的海洋上空存在重力波势能高值.综上所述,我们可以发现在 15~20 km 高度上的重力波基本上都是受地形激发的,且地形切变处存在重力波极值.

图 5 展示了重力波势能在 20~30 km 高度的季节性全球分布,可以发现在此高度上地形激发的重力波依然能从图中分辨,如落基山脉西侧、安第斯山脉西侧、青藏高原北侧等.重力波势能的高值同样存在于赤道附近,并向两极递减,赤道附近的对流作用在此高度上依然对重力波的激发起着主要的作用.比较夏冬两季,我们发现北半球的重力波势能变化更加明显,其中冬季的重力波势能明显大于夏季,但是南半球中低纬区域的差异并不明显,这说明该高度上主要是由于北半球的陆地面积大,陆地产生的明显的季节性对流变化导致了重力波势能在冬夏季节之间的差异[18].同理,我们发现在南极地区,北半球夏季(南半球冬

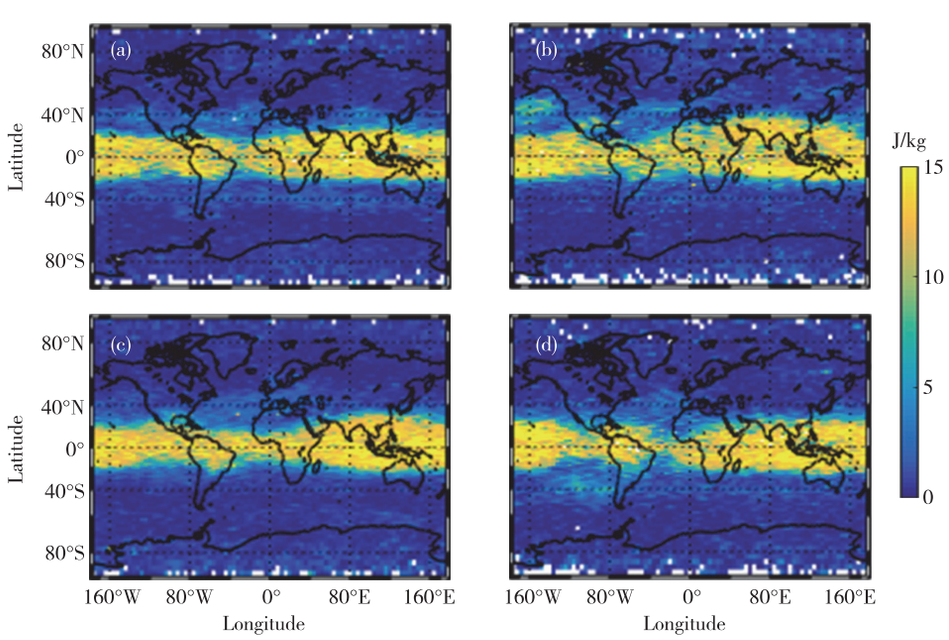


图 4 年内北半球春(a)夏(b)秋(c)冬(d)15~20 km 高度上的重力波势能分布变化

Fig. 4 Global distributions of gravity wave potential energy at the height of 15-20 km in spring (a),summer (b),autumn (c),and winter (d)

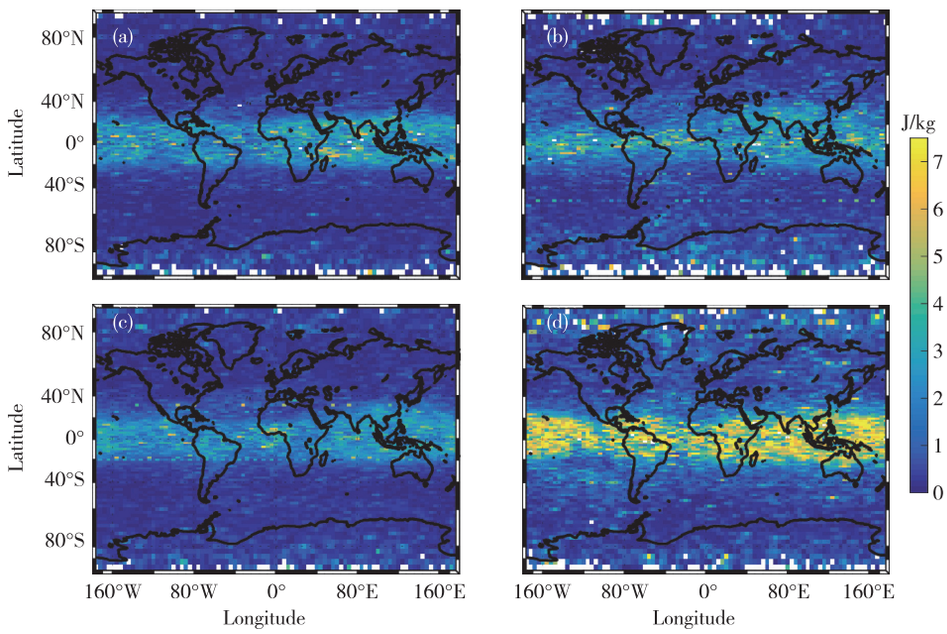


图 5　年内北半球春(a)夏(b)秋(c)冬(d)20~30 km 高度上的重力波势能分布变化

Fig. 5　Global distributions of gravity wave potential energy at the height of 20-30 km in spring (a), summer (b), autumn (c), and winter (d)

季)的重力波势能略高于北半球冬季(南半球夏季),这说明南极大陆上空也存在着季节性对流,并且激发的重力波在该半球冬季起主要作用.

图 6 显示了重力波势能在 30~35 km 的季节性全球分布,可以发现由地形激发的重力波势能不再明显,其分布规律只剩下赤道区域的高值并向两极减小,且北(南)半球冬季的重力波势能较该半球夏季要明显.说明在此高度上,由地形激发的重力波已经耗散殆尽,该高度上重力波的主要来源是对流作用.

图 7 和图 8 分别显示了 20~30 km、30~35 km

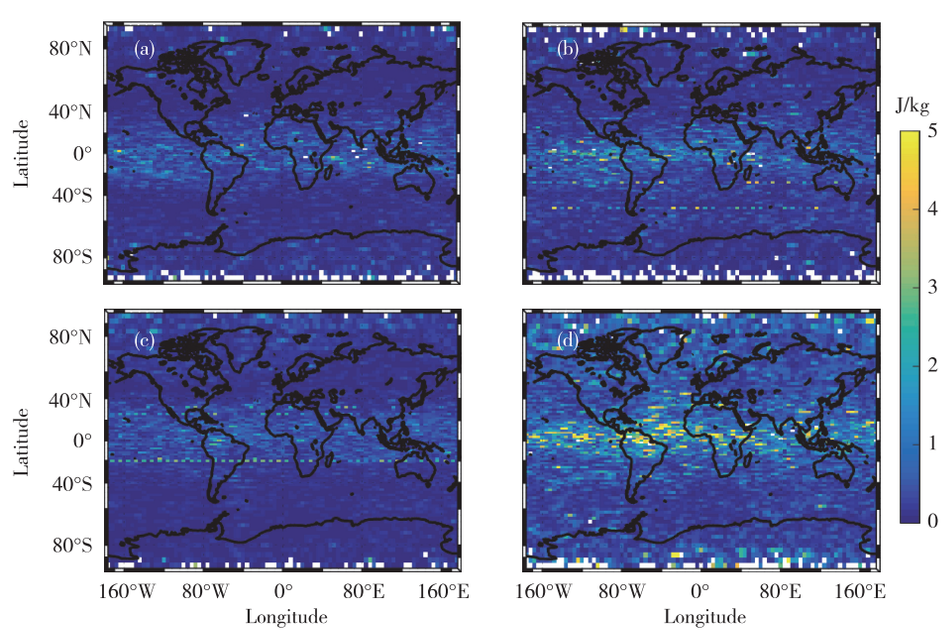


图 6　年内北半球春(a)夏(b)秋(c)冬(d)30~35 km 高度上的重力波势能分布变化

Fig. 6　Global distributions of gravity wave potential energy at the height of 30-35 km in spring (a), summer (b), autumn (c), and winter (d)

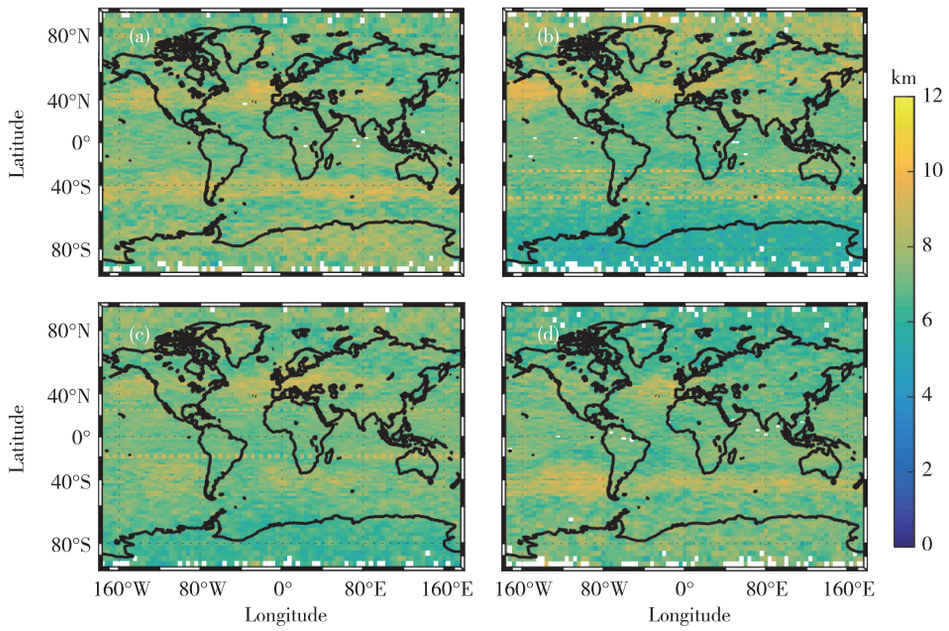


图 7　年内北半球春(a)夏(b)秋(c)冬(d)20~30 km 高度上的重力波垂直波长分布变化

Fig. 7　Global distributions of gravity wave vertical wavelength at the height of 20-30 km in spring (a), summer (b), autumn (c), and winter (d)

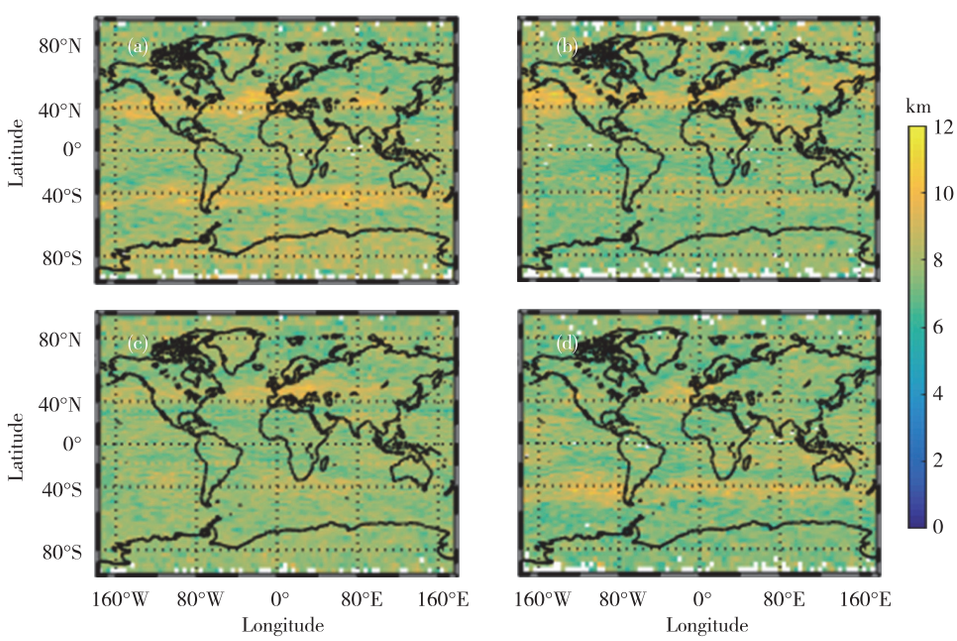


图 8　年内北半球春(a)夏(b)秋(c)冬(d)30~35 km 高度上的重力波垂直波长分布变化

Fig. 8　Global distributions of gravity wave vertical wavelength at the height of 30-35 km in spring (a), summer (b), autumn (c), and winter (d)

上的重力波垂直波长的分布.在 20~30 km 高度上,重力波垂直波长基本上分布在 5~11 km,这与过去的研究结果类似[18].重力波垂直波长在赤道附近较小,在南北纬 40°附近达到极大值,之后再向两极减小,且北(南)半球夏季的重力波垂直波长大于该半球冬季.而在 30~35 km 的高度,重力波垂直波长基本上分布在 7~12 km,较 20~30 km 高度的垂直波长略有增加;同样,在南北纬 40°时取得极大值,向赤道和两极减小,北(南)半球夏季的重力波垂直波长要明显大于该半球冬季的重力波垂直波长.

2.3 重力波参数的年际变化规律

本文利用 FY-3C 掩星数据自发布以来两年时间内的数据,对重力波参数的年际变化规律进行了分析.

图 9 和图 10 显示了各纬度上的高度为 20~30 km 的重力波参数的年际变化.从图 9 可以发现,北半球中高纬地区存在重力波势能的年际变化,在 2015 年夏季和 2016 年夏季存在高值,在 2014 年冬季、2015 年冬季存在次高值,其他时期属于低值;在南半球中高纬地区同样存在着年际变化,在 2014 年冬季、2015 年夏季、2015 年冬季、2016 年夏季呈现出半年的周期现象;2014 年冬季、2015 年冬季赤道附近的重力波势能出现高值,所以赤道附近的重力波势能也存在年际的周期性变化.且观察 2014 年秋季至 2016 年秋季的赤道附近的重力波势能趋势,我们发现重力波势能在缓慢增加,而地形无明显变化,所以这可能是由于赤道附近的对流作用在逐年增强.重力波垂直波长同样也存在类似的情况,在图 10 中,可以发现在北半球中纬地区,2014 年秋、2015 年春、2015 年秋、2016 年夏存在着高值,所以北半球中纬地区的重力波垂直波长存在半年性周期;在南半球中纬地区,2015 年春、2016 年春出现高值,所以南半球中纬地区的重力波垂直波长存在年际的周期变化.

图 11 和图 12 显示了各经度上重力波相关参数的年际变化.从图 11 中可以发现,东半球重力波势能在 2015 年夏、2016 年夏存在高值,在 2014 年冬、2015 年冬存在次高值,2014 年秋、2015 年春、2015

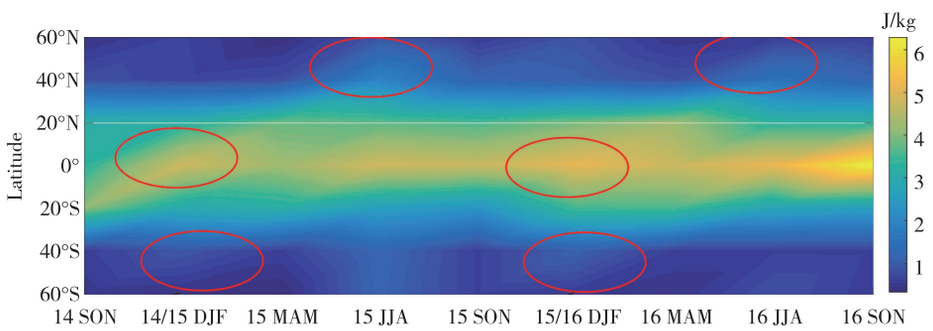


图 9 各纬度上重力波势能的年际变化

Fig. 9 Interannual variation of gravity wave potential energy at different latitudes

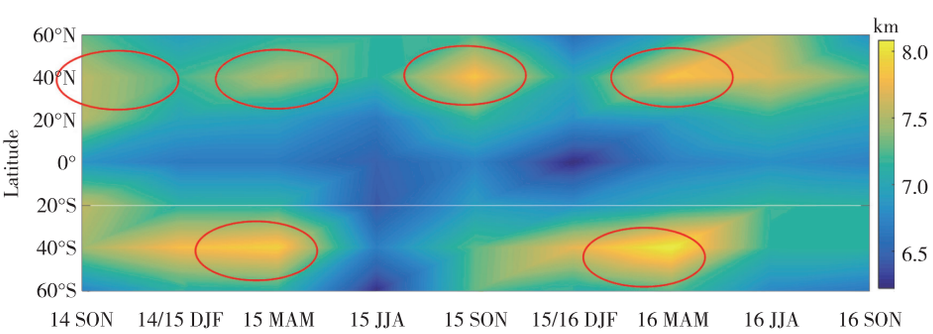


图 10 各纬度上重力波垂直波长的年际变化

Fig. 10 Interannual variation of gravity wave vertical wavelength at different latitudes

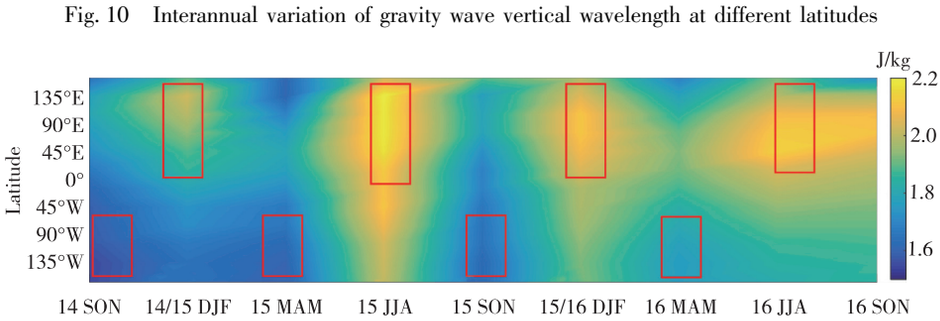


图 11 各经度上重力波势能年际变化

Fig. 11 Interannual variation of gravity wave potential energy at different longitudes

年秋、2016 年春重力波势能相对较低,而西半球的这种变化并不明显.这说明这种年际变化可能是由冬夏时节陆地海洋之间的季节性对流造成的.重力波垂直波长也存在着年际变化,在冬夏季各经线上的重力波垂直波长均值要比春秋季小,在春季重力波垂直波长达到最高值.2015 年夏季的重力波垂直波长最短,导致 2015 年冬季的重力波垂直波长也比往年要短.由于数据年限较短,暂时无法确定其原因,推断其可能是 2015 年的最强厄尔尼诺现象引起的重力波势能的增加和重力波垂直波长的减小.

2.4 重力波参数与地形的关系

地形是诱发重力波的主要因素之一.针对地形与重力波之间的关系,常常选择安第斯山脉与南极洲之间的区域作为研究区域,很多研究结果显示安第斯山脉是该地重力波的主要成因[19].本文分析了北半球夏季 0°~30°S 纬度范围内重力波的纬向分布,如图 13a,图中 25 km 高度以下的重力波势能在 120°W、90°W、50°W、10°E 处存在高值.经过对比该纬度区域的地形高度,我们发现,120°W 处的高值应该是由海洋中的小岛地形造成的,这印证了 Alexander 和 Grimsdell 文中的观点[20];90°W 左右的高值是由东侧南美洲的安第斯山脉的山地引起的;50°W 处的高值是因为南美洲大陆的陆地地形;10°E 附近的高值是由于东侧存在非洲大陆引起的.所以我们可以得出在 25 km 以下的重力波大部分是由于陆地地形激发,然后向上传播至 25 km 左右的高度处消耗殆尽的结论.

同理,我们研究了北半球冬季 25°~40°N 范围内的重力波势能的纬向分布(图 14a).在图中可以清晰地看出 135°W 及 90°~135°E 处存在重力波势能的高值,经过对比该纬度范围内的地形,可知,135°W 处的高值处于北美洲落基山脉西侧,90°~135°E 处的高值处于亚欧大陆的青藏高原,所以在北半球,低层大气重力波同样是由地形激发的.而且 90°~135°E 处的高值异常明显,对于下游地区的重力波势能分布也有广泛的影响,影响范围甚至超过了 135°E 经线.所以青藏高原的重力波对于整个中国的气候气象变化,甚至整个亚欧大陆板块都有着重要的影响.

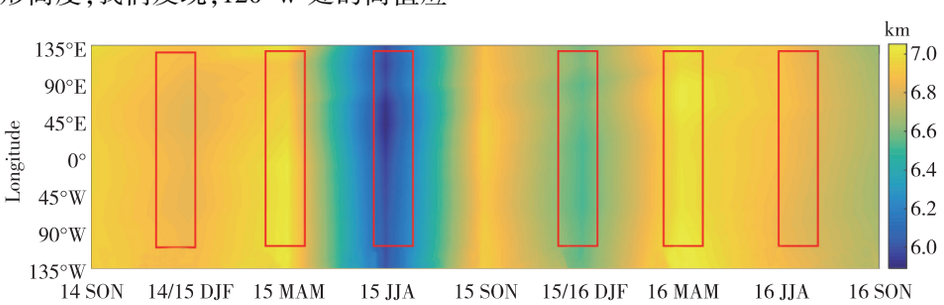


图 12 各经度上重力波垂直波长年际变化

Fig. 12 Interannual variation of gravity wave vertical wavelength at different longitudes

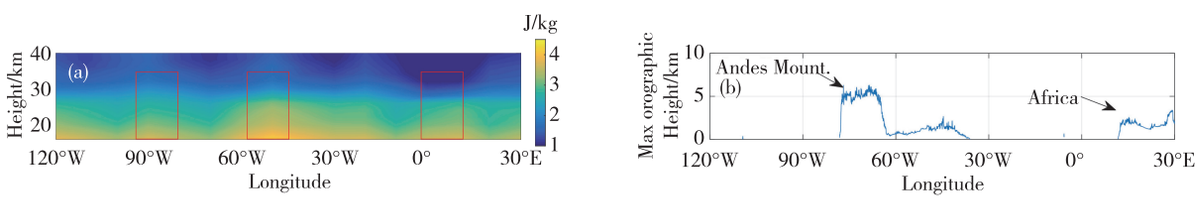


图 13 北半球夏季 0°~30°S 重力波势能纬向分布(a)及最大地形高度(b)

Fig. 13 Zonal distribution of gravity wave potential energy at the latitude of 0°−30°S in summer of the northern hemisphere (a) and maximum terrain height (b)

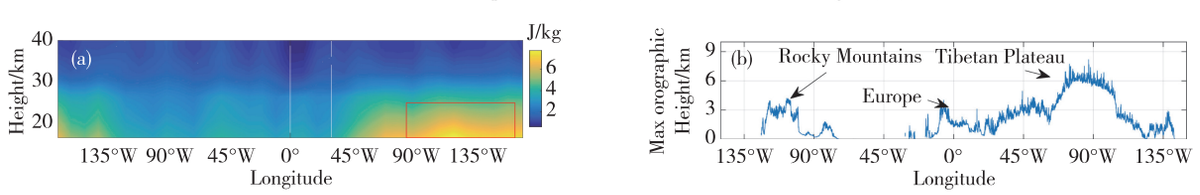


图 14 北半球冬季 25°~40°N 重力波势能纬向分布(a)及最大地形高度(b)

Fig. 14 Zonal distribution of gravity wave potential energy at the latitude of 25°−40°N in summer of the northern hemisphere (a) and maximum terrain height (b)

3 总结

本文利用中国气象卫星 FY-3C 的掩星数据首次获得了全球重力波的分布和变化特征,并探究了其成因.首先分析了各种重力波探测手段的利弊,GNSS 掩星作为一种卫星遥感手段具有其他探测手段无可比拟的优势.并利用 ROPP 软件对大气掩星数据进行了处理,获得了 2014 年 8 月—2016 年 12 月共计 29 个月内的大气温度轮廓线,给出了温度廓线的预处理方法和大气重力波参数的估计方法.最后分析了大气重力波参数时空变化和分布特征,得出以下结论:

1)海陆季节性对流导致冬夏两季的重力波势能强于春秋两季;

2)赤道对流作用导致赤道区域重力波强于两极,且在夏季南半球中低纬度地区重力波活动频繁、冬季北半球中低纬度区域重力波活动频繁;

3)重力波随着高度的上升,势能逐渐下降,表明重力波在向上传播的过程中产生了耗散;

4)地形是低层大气重力波的主要来源.

由于 FY-3C 掩星观测数据量和时间长度不足,如赤道部分的准两年振荡(QBO)现象未探测到,需要后续更多的 GNSS 掩星观测数据进一步分析.

参考文献

References

[1] Alexander M J,Geller M,Mclandress C,et al.Recent developments in gravity-wave effects in climate models and the global distribution of gravity-wave momentum flux from observations and models[J].Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 2010, 136 (650): 1103-1124

[2] Faber A, Llamedo P, Schmidt T, et al. On the determination of gravity wave momentum flux from GPS radio occultation data [J]. Atmospheric Measurement Techniques,2013,6(11):3169-3180

[3] Ern M,Preusse P,Alexander M J,et al.Absolute values of gravity wave momentum flux derived from satellite data [J].Journal of Geophysical Research (Atmospheres), 2004,109(D20):2083-2089

[4] Vincent R A,Alexander M J.Gravity waves in the tropical lower stratosphere:an observational study of seasonal and interannual variability [J]. Journal of Geophysical Research (Atmospheres), 2000, 105 (D14): 17971-17982

[5] dela Torre A,Schmidt T,Wickert J.A global analysis of wave potential energy in the lower stratosphere derived from 5 years of GPS radio occultation data with CHAMP [J]. Geophysical Research Letters, 2006, 33 (24): 194-199

[6] Tsuda T,Ratnam M V,May P T,et al.Characteristics of gravity waves with short vertical wavelengths observed with radiosonde and GPS occultation during DAWEX (Darwin Area Wave Experiment) [J]. Journal of Geophysical Research (Atmospheres), 2004, 109 (D20): 409-420

[7] Wang L,Alexander M J.Global estimates of gravity wave parameters from GPS radio occultation temperature data [J].Journal of Geophysical Research (Atmospheres), 2010,115(D21):6128-6128

[8] 安家春,杜玉军,屈小川,等.掩星大气反演中的电离层二阶项效应的分析[J].武汉大学学报(信息科学版),2015,40(11):1440-1445
AN Jiachun,DU Yujun,QU Xiaochuan,et al.Analysis of second order ionospheric effects on atmospheric parameters estimation in radio occultation[J].Geomatics and Information Science of Wuhan University,2015,40(11):1440-1445

[9] Bai W H,Sun Y Q,Du Q F,et al.An introduction to the FY3 GNOS instrument and mountain-top tests[J].Atmospheric Measurement Techniques,2014,7(6):1817-1823

[10] Fritts D C, Vanzandt T E. Spectral estimates of gravity wave energy and momentum fluxes.Part I:energy dissipation,acceleration,and constraints[J].Journal of the Atmospheric Sciences,1993,50(22):3685-3694

[11] Wüst S,Bittner M.Non-linear resonant wave-wave interaction (triad):case studies based on rocket data and first application to satellite data[J].Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics,2006,68(9):959-976

[12] 梁晨.基于 COSMIC 卫星观测的全球平流层大气重力波的初步研究[D].合肥:中国科学技术大学,2014
LIANG Chen. Preliminary study on global stratospheric atmospheric gravity waves based on COSMIC satellite observations [D]. Hefei: University of Science and Technology of China,2014

[13] Fritts D C, Alexander M J. Gravity wave dynamics and effects in the middle atmosphere [J]. Reviews of Geophysics,2003,41(1):1003

[14] Tsuda T,Nishida M,Rocken C,et al.A global morphology of gravity wave activity in the stratosphere revealed by the GPS occultation data (GPS/MET) [J].Journal of Geophysical Research (Atmospheres), 2000, 105 (D6): 7257-7273

[15] 徐晓华,郭金城,罗佳.利用 COSMIC 掩星资料分析大气重力波参数的全球分布特征[J].武汉大学学报(信息科学版),2015,40(11):1493-1498
XU Xiaohua, GUO Jincheng, LUO Jia. Analysis of the global distribution of the atmospheric gravity wave parameters using COSMIC radio occultation data[J].Geomatics and Information Science of Wuhan University,2015,40(11):1493-1498

[16] Schmidt T,dela Torre A,Wickert J.Global gravity wave activity in the tropopause region from CHAMP radio occultation data[J].Geophysical Research Letters,2008,35(16):428-451

[17] Butterworth S.Theory of filter amplifier[M].Wireless Engineer,1929

[18] 徐晓华,郭金城,罗佳,等.利用 COSMIC RO 数据分析

青藏高原平流层重力波活动特征[J].地球物理学报,2016,59(4):1199-1210
XU Xiaohua, GUO Jincheng, LUO Jia, et al. Analysis of the active characteristics of stratosphere gravity waves over the Qinghai-Tibetan Plateau using COSMIC radio occultation data [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2016,59(4):1199-1210

[19] Alexander M J, Eckermann S D, Broutman D, et al. Momentum flux estimates for South Georgia Island mountain waves in the stratosphere observed via satellite[J]. Geophysical Research Letters, 2009,36(12):1179-1179

[20] Alexander M J, Grimsdell A W. Seasonal cycle of orographic gravity wave occurrence above small islands in the southern hemisphere: implications for effects on the general circulation[J]. Journal of Geophysical Research (Atmospheres), 2013,118(20):11589-11599

Estimation and analysis of global gravity wave using GNSS radio occultation data from FY-3C meteorological satellite

JIN Shuanggen[1,2] GAO Chao[2,3] LI Junhai[2]

1 School of Remote Sensing and Geomatics Engineering, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

2 Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030

3 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

Abstract Atmospheric gravity wave is an important atmospheric dynamic disturbance widely existing in the Earth's atmosphere. It is of great significance to study its distribution and variations for understanding atmospheric physics, atmospheric structure and atmospheric dynamics. Traditional methods of atmospheric gravity wave detection, such as radar and sounding balloon, have the weaknesses of short detection time and low effective detection altitude. The Global Navigation Satellite System (GNSS) Radio Occultation with the advantages of all-weather, low cost and high accuracy has been widely used in the earth's atmosphere detection and research, which provides new observation data for the study of regional or global gravity wave variation and activity characteristics. In this paper, the occultation data of the first Chinese GNSS radio occultation satellite—Fengyu-3C (FY-3C) are used to obtain the atmospheric temperature profile from August 2014 to December 2016, and then the spatial and temporal distribution of gravity wave parameters is estimated and analyzed for the first time. The results show that the potential energy of gravity wave in winter and summer is stronger than that in spring and autumn due to seasonal convection between the land and the sea. Equatorial convection leads to stronger gravity wave in the equatorial region than in the two polar regions. In summer, gravity wave activity is frequent in the middle and low latitudes of the southern hemisphere, and in winter, gravity waves in the middle and low latitudes of the northern hemisphere are active. With the increase of altitude, the potential energy of gravity wave decreases gradually. In addition, the topography is the main source of gravity waves in the lower atmosphere.

Key words GNSS radio occultation; atmospheric gravity wave; FY-3C satellite