

左同连,李永炽,陈鹏,2021. 平流层大气重力波时空分布特征及其可能影响机制[J]. 气象与减灾研究,44(2):87-96.
Zuo Tonglian, Li Yongchi, Chen Peng, 2021. Spatial and temporal distribution of atmospheric gravity waves in stratosphere and its possible influence mechanism[J]. Meteorology and Disaster Reduction Research,44(2):87-96.

平流层大气重力波时空分布特征及其可能影响机制

左同连¹, 李永炽², 陈 鹏²

1. 民航江苏空管分局 气象台, 江苏 南京 210000
2. 广东海洋大学, 广东 湛江 5240004

摘要: 大气重力波是一种普遍存在于大气层中的波动现象,与多种不同尺度天气现象均有密切联系,研究平流层重力波的时空分布特征及其可能影响机制对于全球大气环流、大尺度气候变化和各类中尺度天气系统的研究具有重要意义。利用基于PANGAEA数据中心提供的2002—2015年逐月平流层重力波参数资料和SPARC数据中心提供的1992—1997年逐月纬向风资料,分析了平流层重力波参数的时空分布特征,并讨论了影响平流层重力波变化的可能机制。结果表明,对于重力波参数的纬向平均分布,平流层重力波扰动温度和垂直波长随高度增加而增大,而水平波数和绝对动量通量则相反。在夏半球的中低纬度和冬半球的高纬度存在重力波参数的大值区,在赤道附近全年存在重力波参数的低值区。平流层重力波参数水平分布表现为纬向上的带状分布,强度随季节发生变化。在相同纬度,重力波参数的大值中心出现在大陆,特别是山脉地区。平流层纬向风和重力波参数二者的分布具有一致性,说明背景风对大气的扰动是影响重力波参数的可能机制之一。

关键词: 平流层, 重力波, 时空分布, 影响机制

中图分类号: P466 文献标识码: A 文章编号: 1007-9033(2021)02-0087-10

doi:10.12013/qxyjzyj2021-013

Spatial and Temporal Distribution of Atmospheric Gravity Waves in Stratosphere and Its Possible Influence Mechanism

Zuo Tonglian¹, Li Yongchi², Chen Peng²

1. Meteorological Observatory of Jiangsu Air Traffic Control Branch of Civil Aviation, Nanjing 210000, China
2. Guangdong Ocean University, Zhanjiang 5240004, China

Abstract: Atmospheric gravity wave is a common fluctuating phenomenon in the atmosphere. Stratosphere atmospheric gravity waves are closely related to many different-scale weather phenomena. Study on the spatio-temporal distribution characteristics of stratospheric gravity waves and their possible influence mechanisms are of great significance for the study of global atmospheric circulation, large-scale climate change, and various kinds of mesoscale weather systems. The spatial-temporal distribution characteristics of the stratospheric gravity wave parameters were analyzed based on the monthly data of stratospheric gravity wave parameters during 2002–2015 and the monthly zonal wind data during 1992–1997, and the influence mechanisms of which were also discussed. It showed that the stratospheric gravitational wave perturbation temperature and vertical wavelength increased with height, while the horizontal and absolute momentum fluxes were opposite. Higher gravitational wave parameters were distributed in the medium to low latitude of summer hemisphere and high latitude of winter hemisphere, while lower values concentrated near the equator throughout the year. The stratospheric gravitational wave parameters presented a ribbon distribution along the latitude and the intensity varied with season. At the same latitude, the center of higher gravity wave parameters appeared on land, especially the mountain areas. The consistent distribution between zonal wind and gravitational wave pa-

收稿日期: 2021-03-11; 修訂日期: 2021-04-08.

基金项目: 广东海洋大学中央财政支持地方高校发展专项(编号:000041).

作者简介: 左同连,工程师,主要从事天气气候与航空航天气象的相关研究, E-mail:ztl1371@163.com.

rameter indicated that the background wind disturbing the atmosphere was a possible influence mechanism of the gravitational wave parameters.

Key words: stratosphere; gravity wave; spatial and temporal distributionin; fluence mechanism

0 引言

大气重力波,是一种普遍存在于大气层中的中小尺度的波动现象,也是大气中的主要波动之一,其垂直波长为2—10 km,水平波长可以从数千米到数十千米(Alexander et al, 2010)。在稳定的大气层结中,因为大气中的微小气团产生扰动,大气流体因此偏离平衡位置,并且在重力和浮力的作用下形成具有周期性的振动,这种微小气团上下波动的现象具有波的特性,因此被称为大气重力波(Faber et al, 2013)。重力波的能量密度、波数、传播方向以及耗散机制,因其来源和形成原因的不同而存在差异。由于重力波的动量、能量在大气层中进行传播和耗散,使大气的动量和能量重新分配。重力波还与气候变化有关,比如低层大气扰动产生的重力波向上传播,在中高层大气重力波破碎后影响大气环流和热学结构,导致晴空湍流的发生;在低热层和中间层大气重力波发生破碎耗散,能造成中间层顶温度出现异常。国内外研究也都表明,大气重力波能造成全球大气的热力结构变化和动力调整(Holton, 1983; Fritts and Alexander, 2003; 刘蕾等, 2012),对许多天气现象的产生和发展均有重大影响(陈丹等, 2011; Chen et al, 2013; 洪军等, 2015; 程胡华, 2016; 王凌梓等, 2018)。重力波是大气的基本扰动要素之一,在某种程度上决定天气和气候变化,其活动对各类中尺度天气系统都有重要作用,是触发各种中尺度强对流系统的一个重要因素(McFarlane, 1987; Fritts and Alexander, 2003)。因此,分析重力波的时空分布特征及其可能影响机制对于大气科学研究具有重要意义。近年来,关于大气重力波的研究得到越来越多的关注。目前,对平流层探测的手段主要是三大类:一是原位探测,主要使用探空设备和仪器,有火箭探空和气球探空;二是地基探测,主要有流星雷达、激光雷达、MST(Mesosphere-Stratosphere-Troposphere)雷达、重力波成像仪等;三是天基探测,有 TIMED(Thermosphere, Ionosphere, Mesosphere Energetics and Dynamics)联合探测卫星的COSMIC(Constellation Observing System for Meteorology, Ionosphere and Climate)掩星数据。其中,能够用来观测中高层大气重力波的探测手段

主要有地基遥感和卫星遥感,对平流层的重力波信息的提取主要来自大气垂直探测器(Hoffmann et al, 2013),对中间层顶重力波信息的提取主要来自卫星微光探测器(Yue et al, 2009),对中间层大气重力波特征的提取主要来自气辉观测(Smith et al, 2000)。卫星探测有较高的垂直或水平分辨率和全球覆盖度,因此在平流层重力波探测中被普遍运用(Fetzer and Gille, 1994; Wu and Waters, 1996; Tsuda et al, 2000)。前人分别利用HIRDLS(High Resolution Dynamics Limb Sounder)、SABER(Sounding of the Atmosphere Using Broadband Emission Radiometry)等数据对重力波进行了研究,例如Ern(2004)、Alexander(2008)等对不同波长的重力波进行研究,对平流层重力波对不同天气过程的影响进行分析。此外,钱浩俊等(2012)基于重力波气辉成像观测结果分析了中间层顶大气重力波特征。姚志刚等(2015)基于AIRS观测资料分析了东亚夏季平流层重力波的复杂特征,并得到重力波与对流活动的关联性。洪军等(2015)基于AIRS观测资料和WRF数值模式模拟分析了台风诱发的平流层重力波扰动特征。王一洲等(2019)利用COSMIC卫星观测资料研究了对平流层重力波参数。金双根等(2020)利用FY-3C气象卫星和GNSS掩星数据估计了全球重力波变化特征。

平流层大气重力波与多种不同尺度天气现象均有密切联系,影响全球大气环流,影响大尺度气候变化和各类中尺度天气系统。到目前为止,国内的气象学者较少应用TIMED卫星资料分析平流层大气重力波。文中应用TIMED卫星的SABER探测数据对平流层大气重力波的时空分布特征及其可能影响机制进行分析,以期为大气重力波研究提供参考。

1 资料和方法

1.1 资料

使用的资料包括:1) PANGAEA数据中心提供的GRACILE(gravity wave climatology based on atmospheric infrared limb emissions observed by satellite)再分析资料(地址:<https://doi.pangaea.de/10.1594/PANGAEA.879658>),此数据包括了基于TIMED联合探测卫星上搭载的SABER探测器

提供的2002—2015年逐月平均重力波温度方差、垂直波长、水平波长、绝对动量通量的30、40、50 km三个高度层的全球水平分布数据,水平分辨率为 $10^\circ \times 5^\circ$,同时包括了纬向平均数据,水平分辨率为 5° ,垂直分辨率为1 km。2) SPARC项目数据中心提供的1992—1997年逐月纬向风气候平均数据(地址:<https://www.sparc-climate.org/data-centre/data-access/reference-climatology/randals-climatologies/temperature-wind-climatology/>)。

1.2 方法

文中将全年分为冬、春、夏、秋四个季节来研究重力波和平均纬向风场,规定12、1、2月为冬季,3、4、5月为春季,6、7、8月为夏季,9、10、11月为秋季。考虑到SABER探测器观测的纬度范围以及运行周期,在进行平均时,将不考虑缺测值。同时,选取30—50 km高度层代表平流层进行研究,得到重力波参数的纬向平均垂直分布和全球水平分布,用于分析重力波参数的时空变化特征。SPARC项目数据中心提供的纬向风气候平均数据以各种来源的数

据组合而成,可信度和准确性较高。因为纬向风气候平均态稳定,故采用此数据分析纬向风的分布特征,与重力波参数分布特征进行对比,讨论影响重力波参数的可能机制。

2 平流层大气重力波时空分布特征

2.1 重力波扰动温度

温度垂直廓线的波动通常可以表现重力波的活动。图1显示了2002年2月—2015年1月不同季节平流层重力波平均扰动温度的纬向平均垂直剖面,表示的是去除大气背景状态之后获得的重力波扰动温度。总体来看,平流层重力波扰动温度的范围为0—30 K²,绝大多数高度层和地区的扰动温度在12 K²以内。从垂直方向分布来看,重力波扰动温度随高度的增加总体呈增大趋势,在一些地区平流层底层和顶层的扰动温度甚至相差10 K²以上,这主要是由于大气密度随高度增加而降低所致。此外,从经向分布来看,冬半球高纬度地区的温度扰动相比低纬度地区要明显得多,相差4—6 K²。

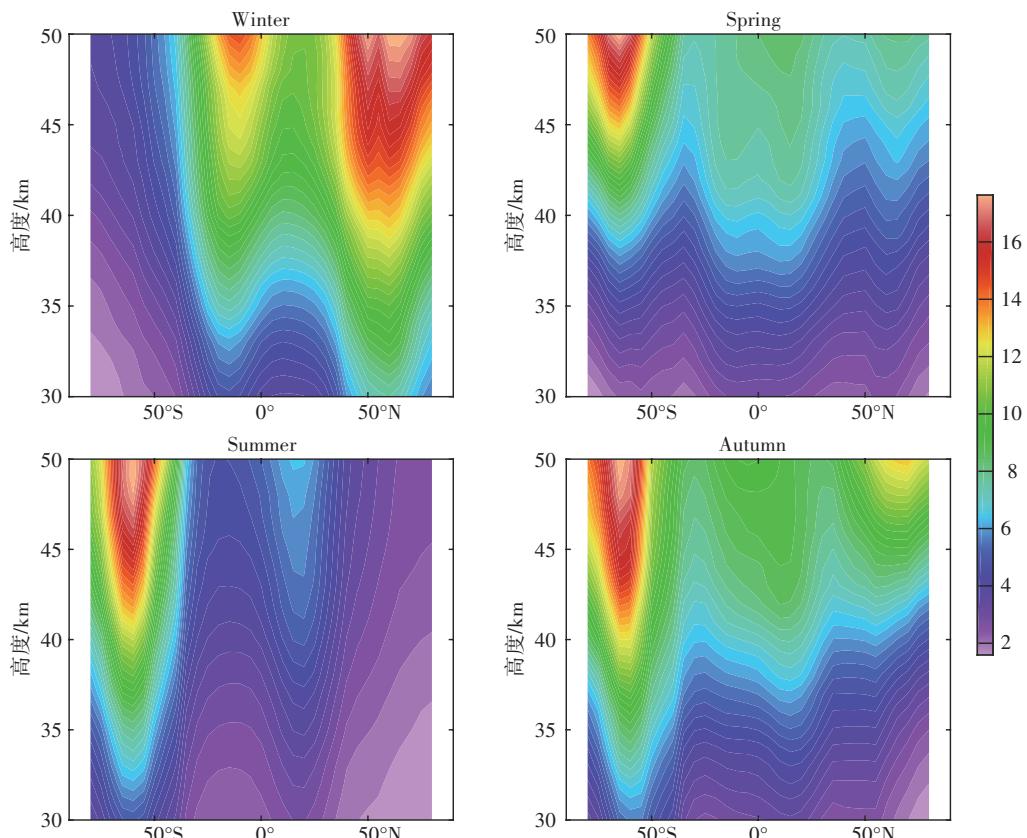


图1 纬向平均重力波扰动温度(单位:K²)乘以2的垂直剖面

Fig. 1 Vertical profile of zonal average gravity wave disturbance temperature (units: K²) multiplied by 2

从不同季节、不同高度层重力波扰动温度的全球分布(图2)可以看出,同一高度层上,全年扰动温度的高值带都存在于风带中,而且随着季节变化而出现或者消失。分析还发现,赤道附近全年都存在一个低值带,随着季节变化只有较小的南北移动,这都与纬向平均垂直剖面(图1)揭示的分布特征相对应。夏季,亚热带地区的扰动温度有所增强,其中一

个主要原因是重力波激发源和副热带小振幅波为平方振幅和动量急流的传播提供了有利条件。在同一纬度,大陆上空的扰动温度普遍比海洋上空要大,高值中心一般出现在大陆,这是由地形因素和极地急流与之相关的重力波源的强烈活动造成的,而且强背景风也为重力波与背景风方向相反的传播提供了有利条件。

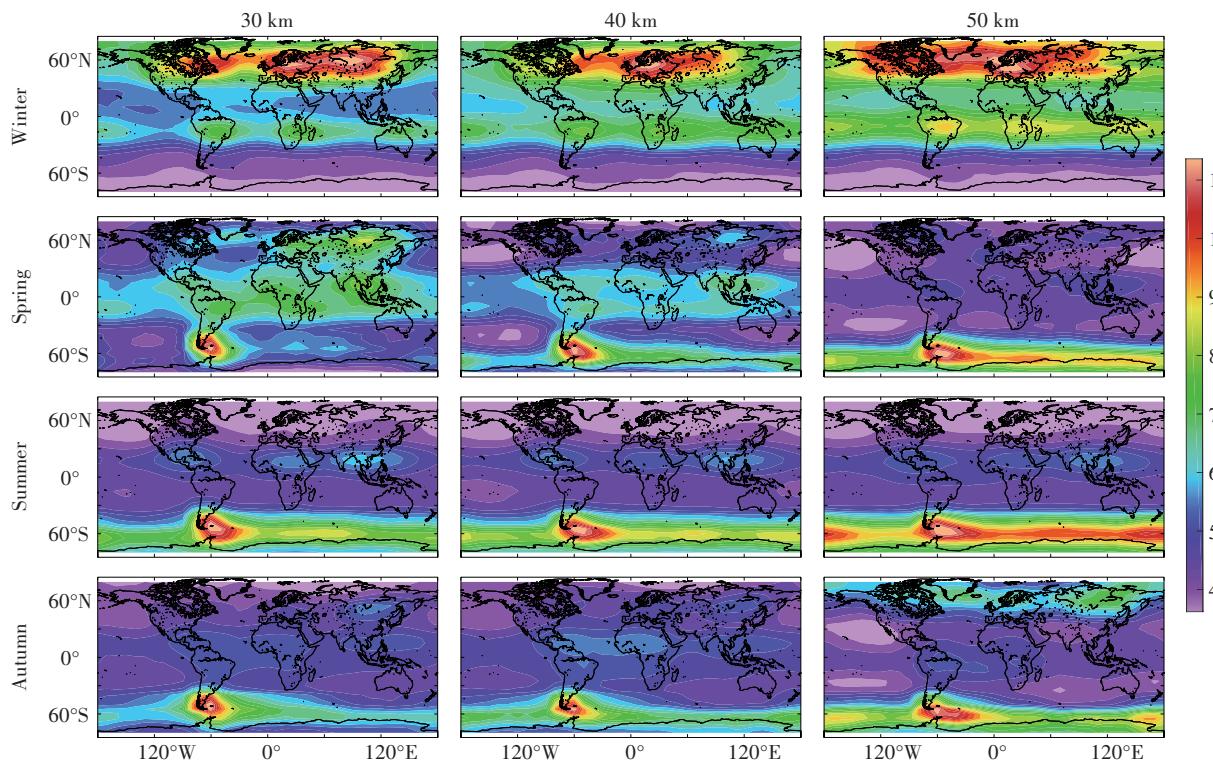


图2 冬季、春季、夏季、秋季 30 km、40 km、50 km 高度层重力波扰动温度的全球分布(单位: K^2)

Fig. 2 Global distribution of temperature perturbed by gravity waves at the height of 30 km, 40 km, and 50 km in winter, spring, summer, and autumn (units: K^2)

2.2 重力波垂直波长

由所有单一温度垂直廓线确定的平流层重力波垂直波长为9—13 km。垂直波长的平均分布有几个主要特征:首先,与重力波扰动温度的垂直分布特征相同,垂直波长随高度增加而普遍增大,在平流层高层和低层相差1.5 km(图3),这与Preusse等(2006)的研究结果一致。主要原因是大气密度随高度增加而减少,稳定传播的重力波其振幅随高度增加而增大。对于中频重力波,其饱和振幅与垂直波长成比例,因此对应的垂直波长随高度增加而增大。在纬向上,赤道附近重力波垂直波长经常保持低值,而且向两极逐渐增大。在低层,同一季节里南半球的垂直波长普遍比北半球大。

平流层重力波垂直波长在水平上的分布特征与

扰动温度相似,在纬向上呈现带状分布,两条分布带分别位于中低纬度和中高纬度区域,随季节变化其范围会扩大或减小(图4)。由于其饱和振幅较小,短垂直波长重力波会在较低高度层饱和,因此,随着高度的增加,垂直波长较长的重力波将主导全球分布。由图4还可以看出,垂直波长随高度增加而递减,在50 km高度上垂直波长几乎都大于11 km,这一现象能很好地证明这一观点。与之相对,在低海拔地区,平均垂直波长更短。

重力波垂直波长另一个主要分布特征是,在背景风区,垂直波长异常增大,特别是在冬季的北半球高纬度地区和夏季的南半球高纬度地区,因为重力作用,与背景风相反方向传播的波因为多普勒频移而叠加到较长的垂直波上,这些波获得更大的饱和

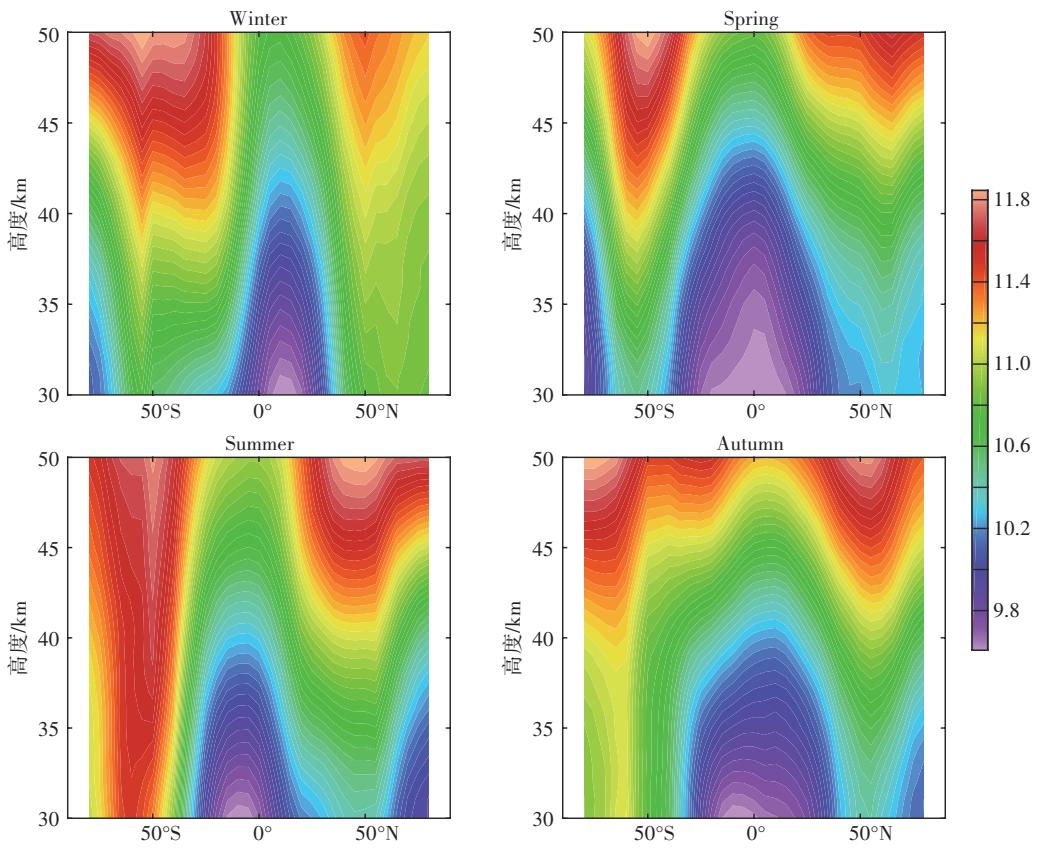


图3 纬向平均的重力波垂直波长的纬向平均垂直剖面(单位:km)

Fig. 3 Vertical profile of the vertical wavelength for zonal average gravity wave (units:km)

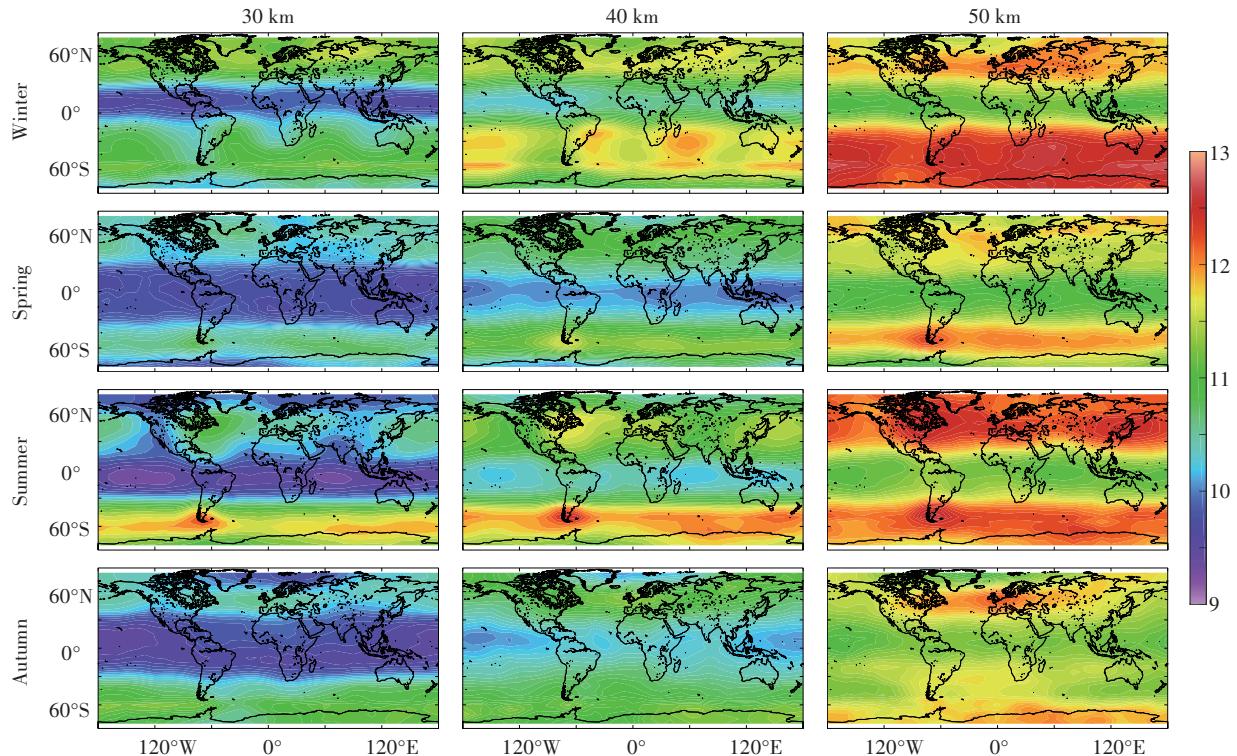


图4 同图2,但为重力波垂直波长(单位:km)

Fig. 4 Same as Fig.2, but for vertical wavelength of gravity wave (units:km)

振幅,因此在这些地区主导重力波谱。

2.3 重力波水平波数

与垂直波长不同,平流层重力波的水平波长可以达到数千千米,因此以水平波长的倒数来表示的平均水平波数会低至 10^{-4} 量级。由图5可以看出,水平波数分布表现为由低纬度地区向两极先增加后减少,最显著的特征是经向分布上低纬度地区表现为低值,这种影响可能是由于在热带科里奥利参数较小,所以可以存在水平波长更长的重力波,进而导致水平波数值较小。然而与重力波扰动温度和垂直波长不同的是,水平波数是随高度增加而减少,推测其部分原因可能是SABER具有采样距离随高度增

加而增大这一物理特性。

从全球来看,平流层重力波的水平波数在纬向上也是同样呈现近似的带状分布(图6)。对比东、西半球发现,东半球的重力波水平波数普遍要少;在中高纬度的高值带中,全年的高值区出现在欧亚大陆北部、北美洲北部、南美洲南部,普遍位于南、北半球的高纬度大陆地区。不难发现,水平波数分布显示了与特定重力波源区域有关的高波数的几种增强,例如,安第斯山脉南部和南极半岛的水平波数值增大,该地区以强烈山波活动而闻名。此外,在夏半球,深对流区作为重力波的强来源地区,因此副热带地区的水平波数明显增多。

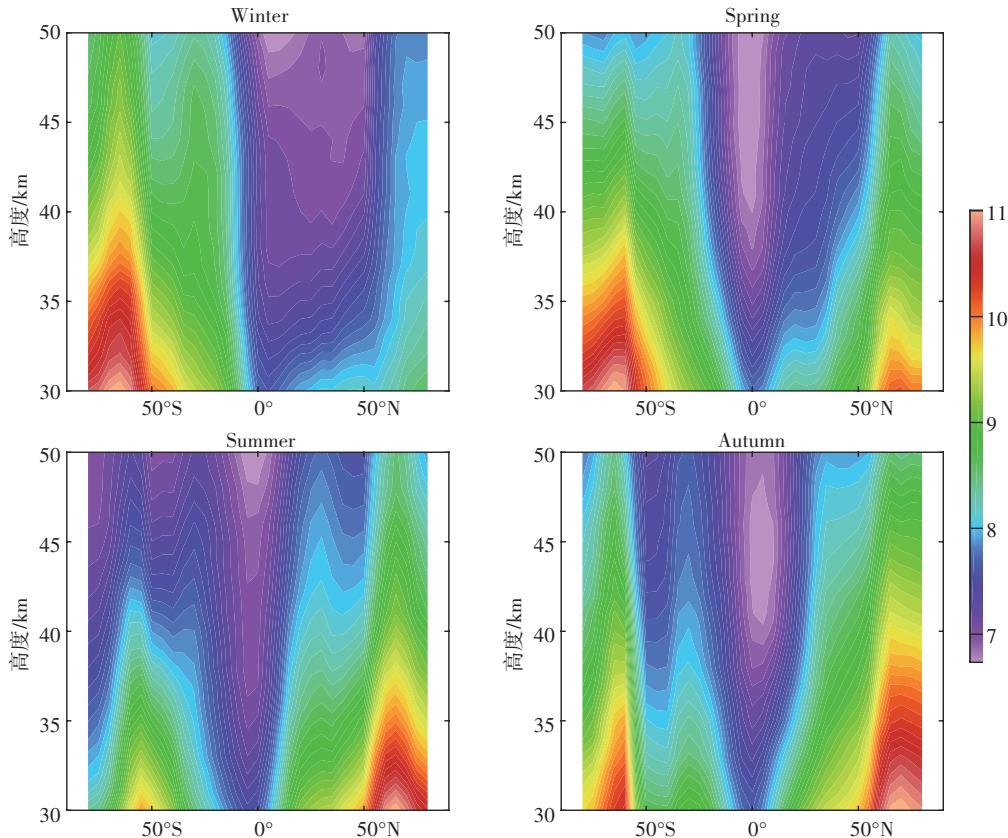


图5 纬向平均的重力波水平波数的垂直剖面(单位: 10^{-4} km^{-1})

Fig. 5 Vertical profile of horizontal wave number for zonal average gravity wave (units: 10^{-4} km^{-1})

2.4 重力波绝对动量通量

图7给出了纬向平均重力波绝对动量通量的垂直剖面,其中重力波动量通量通常是用温度垂直廓线对的重力波振幅、垂直波长和水平波数计算得到的。总体上平流层重力波的绝对动量通量在2 mPa以内,类似于重力波扰动温度,位于冬季极地和夏季副热带的动量通量会有所增强。然而,与扰动温度

和垂直波长相反的是,动量通量随高度的增加而普遍减少,这可以表明重力波随高度的增加而总体是消散的。

绝对动量通量与重力波其他参数相似,纬向几乎呈现带状分布,但其局部的高值中心更为明显。其分布与冬季极涡的增强值和夏季副热带由对流重力波源分布引起的特征性经向结构非常相似。分析

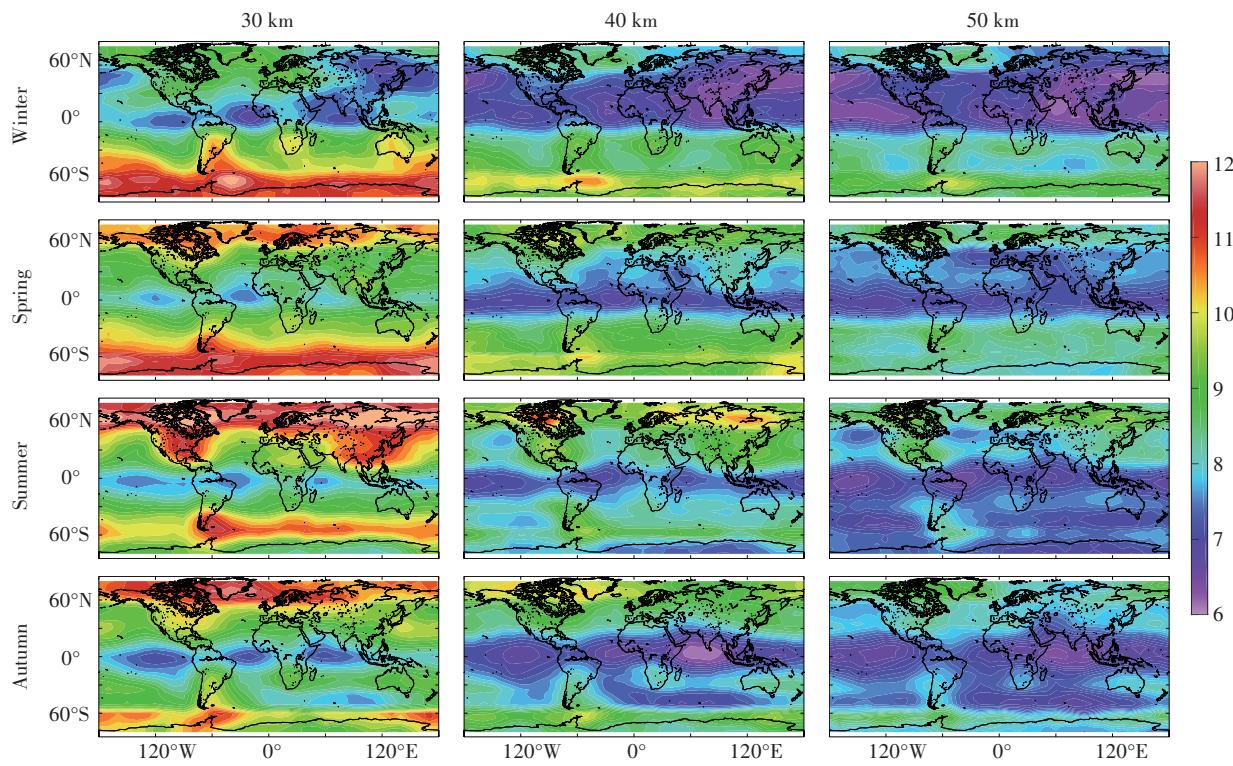
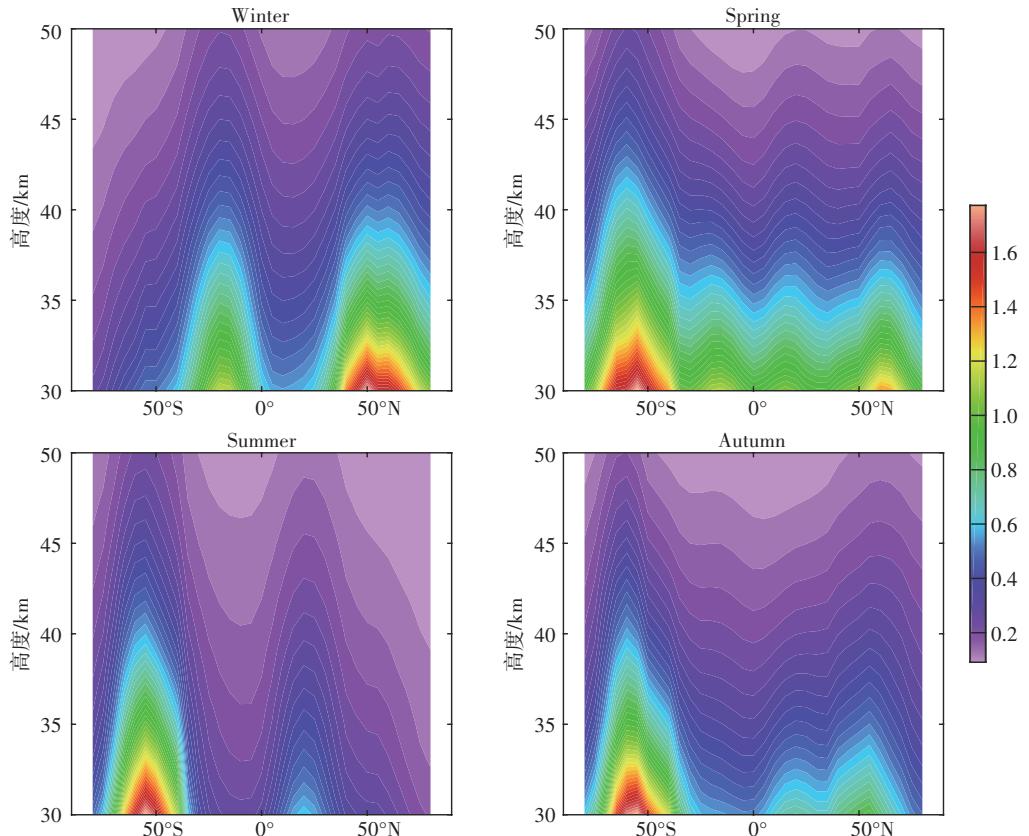
图 6 同图 2,但为重力波水平波数(单位: 10^{-4} km^{-1})Fig. 6 Same as Fig.2, but for horizontal wave number of gravity wave (units: 10^{-4} km^{-1})

图 7 纬向平均的重力波水平波数的垂直剖面(单位:mPa)

Fig. 7 Vertical profile of the absolute momentum flux for zonal average gravity wave (units:mPa)

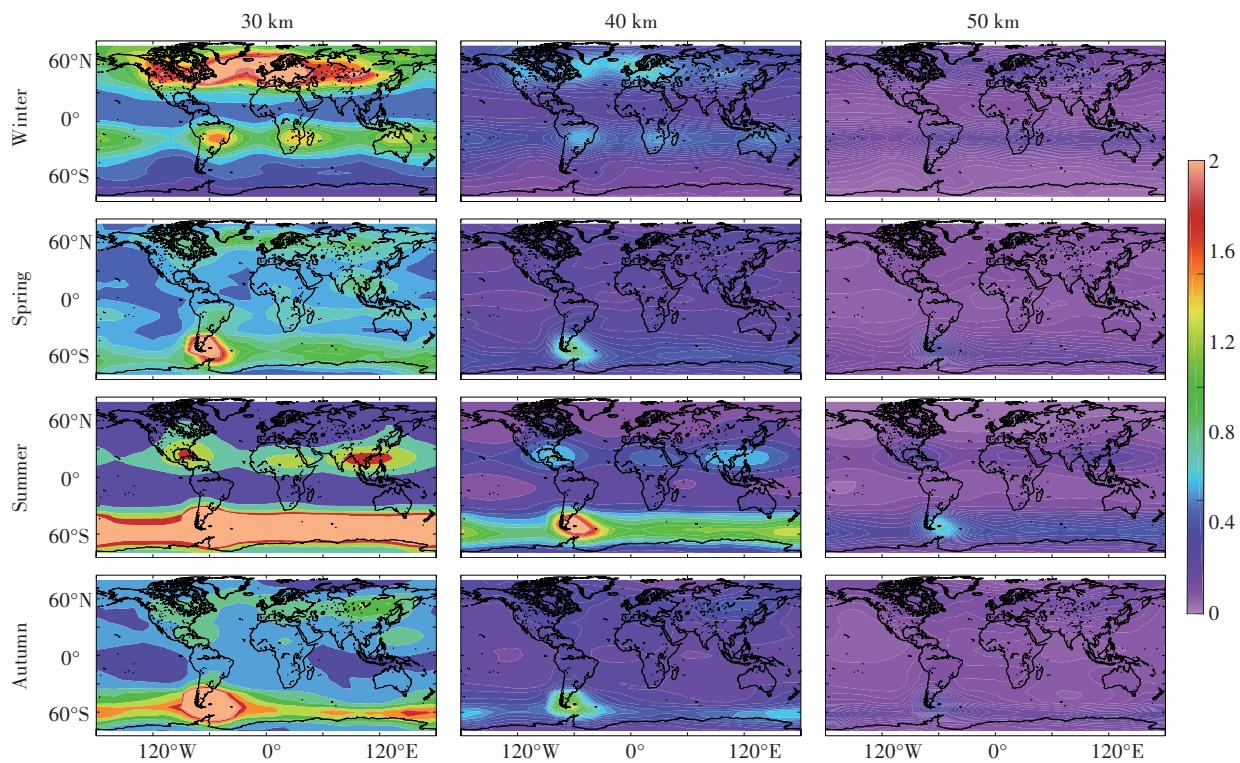


图 8 同图 2,但为重力波绝对动量通量(单位:mPa)

Fig. 8 Same as Fig.2, but for absolute momentum flux of gravity wave (units:mPa)

图 8 发现,春、夏期间南半球的南安第斯山脉和南极半岛的地区的重力波活动十分显著,这一地区被称为明显的山波源。

3 平流层重力波参数可能影响机制

已有的平流层重力波参数的研究结果(Polygonen and Zhang, 2014)表明,影响平流层重力波参数大小的可能机制之一是背景风对平流层大气的扰动,强背景风为重力波与背景风相反的传播提供了有利的传播条件。

由第 2 章分析结果不难看出,平流层重力波参数分布与全球风场的分布存在联系。图 9 给出了平均纬向风分布,负值为西风,正值为东风。可以看出,冬半球高纬度的风速较大,而且盛行东风;而相反的是,夏半球风速大值区处于中低纬度区域,盛行西风。在赤道附近全年都存在一个风速小值区,仅仅会随着季节变化而发生微小的南北移动。在平流层,风速随高度增加而增大。由此可知,平流层平均纬向风的分布与重力波参数的分布非常一致,尤其是与重力波扰动温度和垂直波长的分布相吻合,风速的大值区对应扰动温度和垂直波长的大值区,小值区也对应一致。这一现象说明,背景风对平流层大气的扰动是影响重力波参数的主要因素之一。

4 结 论

文中利用 2002—2015 年平均的全球平流层重力波参数数据和 1992—1997 年逐月纬向风数据,分析了平流层重力波参数的时空分布特征,并讨论了其可能影响机制,得到如下结论:

1) 纬向平均的垂直分布上,平流层重力波扰动温度和垂直波长随高度增加而增大,可能的原因是大气密度随高度增加而减小。水平波数和绝对动量通量则相反,随高度增加而减小,而绝对动量通量的减小说明重力波普遍随高度增加而消散。在赤道附近全年存在重力波参数的低值区,只会随着季节有着较小的南北移动。在夏半球的中低纬度和冬半球的高纬度存在重力波参数的大值区,而同一个季节相对比,南半球的重力波参数普遍比北半球要大。

2) 水平分布上,平流层重力波参数在纬向近似呈现带状分布,大致与纬向风场相对应,参数的强弱随季节而变化。在相同纬度上,大陆地区的重力波参数要海洋地区大,特别是山脉地区,可能原因是陆地对重力波的激发有重要影响。

3) 平流层纬向风与重力波参数分布具有一致性,重力波参数分布与全球纬向风场相对应,这表明背景风对大气的扰动是重力波参数的可能影响机制

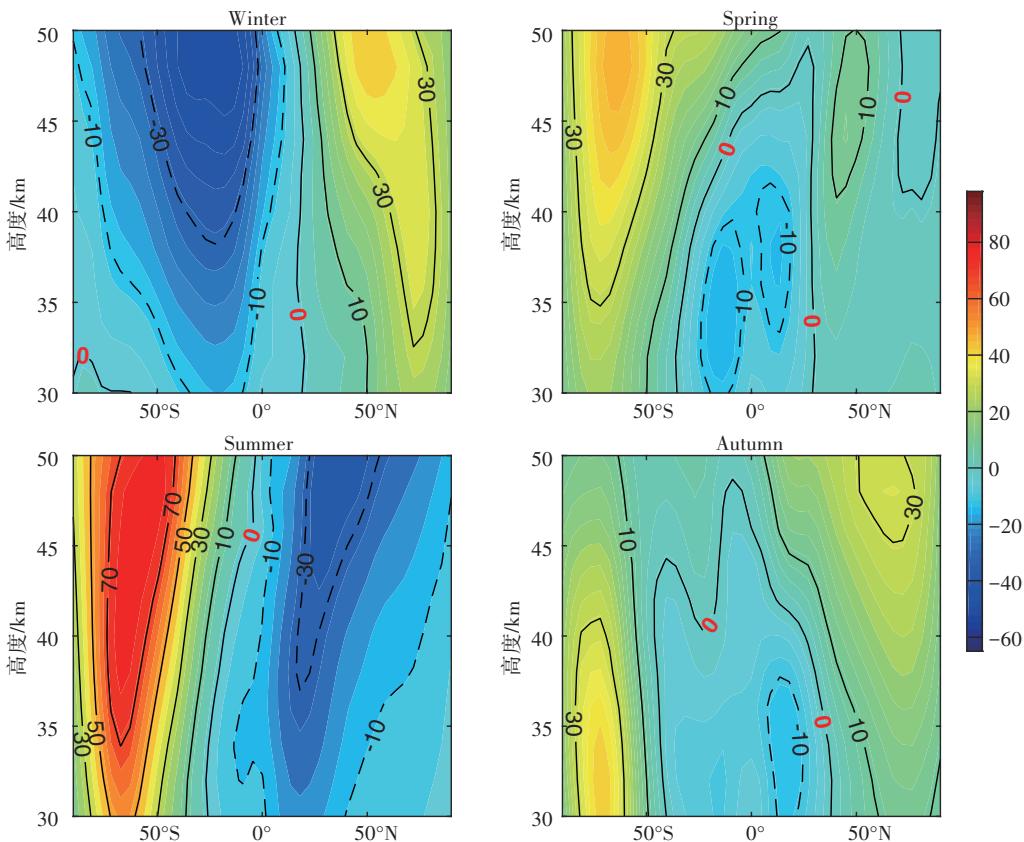


图9 平均纬向风垂直剖面(单位:m/s;虚线(实线)表示西风(东风))

Fig. 9 Vertical profile of mean zonal wind (units:m/s; dotted line (solid line) represents west wind (east wind))

之一。

文中分析了平流层重力波参数的时空分布特征和可能影响机制,但还有很多不足需要改进。文中分析平流层重力波参数,只分析了扰动温度、垂直波长、水平波数、绝对动量通量四个参数的分布情况,除此之外还有其他重力波参数还有待研究;影响重力波参数的因素有很多,文中只讨论了一种可能影响机制,其他影响机制还待进一步的研究。

参考文献(References)

- Alexander M J, Geller M, McLandress C, et al, 2010. Recent developments in gravity-wave effects in climate models and the global distribution of gravity-wave momentum flux from observations and models[J]. Quart J Roy Meteor Soc,136(650):1103-1124.
- Alexander S P, Tsuda T, Kawatani Y, et al, 2008. Global distribution of atmospheric waves in the equatorial upper troposphere and lower stratosphere: COSMIC observations of wave mean flow interactions[J]. J Geophys Res Atmos,113(D24):115.
- 陈丹,陈泽宇,吕达仁,2011. 台风“麦莎”(Matsa)诱发平流层重力波的数值模拟[J]. 中国科学:地球科学,41(12):1786-1794.
- Chen D, Chen Z Y, Lyu D R, 2011. Numerical simulation of

the stratospheric gravity wave induced by Typhoon Matsa[J].

Scientia Sinica (Terrae),41(12):1786-1794.(in Chinese)

Chen D, Chen Z Y, Lü D R, 2013. Spatiotemporal spectrum and momentum flux of the stratospheric gravity waves generated by a typhoon[J]. Sci China Earth Sci,56(1):54-62.

程胡华,2016. 晋西北地区一次雷阵雨天气过程中重力波参数演变特征[J]. 干旱气象,34(5):811-819. Cheng H H, 2016. Evolution characteristics of gravity wave parameters during a thunderstorm in northwest Shanxi[J]. Arid Meteor,34(5):811-819. (in Chinese)

Ern M, Preusse P, Alexander M J, et al, 2004. Absolute values of gravity wave momentum flux derived from satellite data[J]. J Geophys Res Atmos,109(D20):1-17.

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

Fetzer E J, Gille J C, 1994. Gravity wave variance in LIMS temperatures. Part I: Variability and comparison with background winds[J]. J Atmos Sci,1(17):2461-2483.

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

Hoffmann L, Xue X, Alexander M J, 2013. A global view of stratospheric gravity wave hotspots located with Atmospheric Infra-

- red Sounder observations[J]. *J Geophys Res Atmos*, 118(2): 416-434.
- Holton J R, 1983. The influence of gravity wave breaking on the general circulation of the middle atmosphere[J]. *J Atmos Sci*, 40(10): 2497-2507.
- 洪军,姚志刚,韩志刚,等,2015. 台风“梅花”诱发平流层重力波的数值模拟与 AIRS 观测[J]. 地球物理学报,58(7): 2283-2293.
- Hong J, Yao Z G, Han Z G, et al, 2015. Numerical simulation and AIRS observation of the stratosphere gravity wave induced by Typhoon Muifa[J]. *Chinese J Geophys*, 58(7): 2283-2293. (in Chinese)
- 金双根,高超,李君海,2020. 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),12(1): 57-67. Jin S Y, Gao C, Li J H, 2020. Estimation of global gravity wave change by FY-3C meteorological satellite GNSS occultation[J]. *J Nanjing Univ Inf Sci Technol*, 12(1): 57-67.(in Chinese)
- 刘蕾,丁治英,常越,等,2012. WRF 中地形重力波参数化方案在一次华南暖区暴雨形成机制分析中的应用[J]. 气象科技,40(2): 232-240. Liu L, Ding Z Y, Chang Y, Chen M Q, 2012. Application of WRF terrain gravity wave in rainfall mechanism in warm area of South China[J]. *Meteor Sci Technol*, 40(2): 232-240.(in Chinese)
- McFarlane N A, 1987. The effect of orographically excited gravity wave drag on the general circulation of the lower stratosphere and troposphere[J]. *J Atmos Sci*, 44(14): 1775-1800.
- Plougonven R, Zhang F, 2014. Internal gravity waves from atmospheric jets and fronts[J]. *Rev Geophys*, 52(1): 33-76.
- Preusse P, Ern M, Eckermann S D, et al, 2006. Tropopause to mesopause gravity waves in August: Measurement and modeling[J]. *J Atmos Sol-Ter Phy*, 68(15): 1730-1751.
- 钱浩俊,胡雄,涂翠,2012. 星载全球大气波动成像仪研究[J]. 空间科学学报,32(3): 362-367. Qian H J, Hu X, Tu C, 2012. Research on the starborne global atmospheric voltuuation imager [J]. *Chin J Spac Sci*, 32(3): 362-367. (in Chinese)
- Smith S M, Mendillo M, Baumgardner J, et al, 2000. Mesospheric gravity wave imaging at a subauroral site: First results from Millstone Hill [J]. *J Geophys Res Space Phys*, 105 (A12): 27119-27130.
- Tsuda T, Nishida M, Rocken C, et al, 2000. A global morphology of gravity wave activity in the stratosphere revealed by the GPS occultation data (GPS/MET)[J]. *J Geophys Res Atmos*, 105 (D6): 7257-7273.
- 王凌梓,苗峻峰,韩芙蓉,2018. 近 10 年中国地区地形对降水影响研究进展[J]. 气象科技,46(1): 64-75. Wang L Z, Miao J F, Han F R, 2018. Research progress on the influence of topography on precipitation in China in the past 10 years[J]. *Meteor Sci Technol*, 46(1): 64-75. (in Chinese)
- 王一洲,黄莹莹,李汇军,等,2019. 基于 COSMIC 的平流层重力波参数分析[J]. 空间科学学报, 39(3): 326-341. Wang Y Z, Huang Y Y, Li H J, et al, 2019. The parameter analysis of the stratosphere gravity wave based on COSMIC[J]. *Chin J Spac Sci*, 39(3): 326-341. (in Chinese)
- Wu D L, Waters J W, 1996. Satellite observations of atmospheric variances: A possible indication of gravity waves[J]. *Geophys Res Lett*, 23(24): 3631-3634.
- 姚志刚,赵增亮,韩志刚,2015. AIRS 观测的东亚夏季平流层重力波特征[J]. 地球物理学报,58(4): 1121-1134. Yao Z G, Zhao Z L, Han Z G, 2015. Characteristics of summer stratospheric gravity waves in East Asia observed by AIRS[J]. *Chinese J Geophys*, 58(4): 1121-1134. (in Chinese)
- Yue J, Vadas S L, She C Y, et al, 2009. Concentric gravity waves in the mesosphere generated by deep convective plumes in the lower atmosphere near Fort Collins, Colorado[J]. *J Geophys Res Atmos*, 114(D6): 104.