0254-6124/2022/42(5)-0919-08 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

YANG Wenkai, YANG Junfeng, GUO Wenjie, YANG Xiaohua, XIA Zhongfei, ZHANG Bingyan, CHENG Xuan, HU Xiong. Global Stratospheric Gravity Wave Characteristics by Aura/MLS and TIMED/SABER Observation Data (in Chinese). *Chinese Journal of Space Science*, 2022, **42**(5): 919–926. DOI:10.11728/cjss2022.05.210906098

Aura/MLS 与 TIMED/SABER 观测全球重力波特性*

杨文凯[1] 杨钧烽[2] 郭文杰[2] 杨晓华[1]
夏仲飞[1] 张炳炎[2] 程 旋[2] 胡 雄[2]

1(中国人民解放军 31010 部队 北京 100081)

2(中国科学院国家空间科学中心 空间环境态势感知技术重点实验室 北京 100190)

摘 要 大气重力波是临近空间环境主要大气波动之一，对全球环流具有重要影响。卫星上搭载的临边探测器能够探测临近空间大气温度，可用于临近空间大气重力波研究。利用 2012－2014 年 Aura 的微波临边探测器（MLS）和 TIMED 的红外临边探测器（SABER）的探测数据，对 20～50 km 高度的大气重力波扰动分布特征开展了分析研究，两种观测重力波活动基本一致，重力波随季节、纬度及高度的变化显著。冬季半球高纬度重力波扰动较强，赤道和夏季半球近赤道地区上空也存在明显重力波活动区域，夏季半球高纬度重力波扰动最弱。重力波扰动强度随高度增加。TIMED/SABER 重力波扰动强度数值比 Aura/MLS 略强。

关键词 卫星数据，Aura/MLS，TIMED/SABER，重力波

中图分类号 P351

Global Stratospheric Gravity Wave Characteristics by Aura/MLS and TIMED/SABER Observation Data

YANG Wenkai[1] YANG Junfeng[2] GUO Wenjie[2] YANG Xiaohua[1]
XIA Zhongfei[1] ZHANG Bingyan[2] CHENG Xuan[2] HU Xiong[2]

1(31010 *Troops of PLA*, *Beijing* 100081)

2(*Key Laboratory of Science and Technology on Environmental Space Situation Awareness*, *National Space Science Center*, *Chinese Academy of Sciences*, *Beijing* 100190)

Abstract Gravity waves are one of the main atmospheric waves in near space environment and have an important impact on the global atmosphere circulation. The limb-sounding instruments on the satel-

* 中国科学院 A 类战略性先导科技专项（XDA17010301），国家自然科学基金项目（41905038, 41675031, 42174192, 11872128）和中国科学院国家空间科学中心“攀登计划”项目共同资助

2021-09-05 收到原稿，2022-05-15 收到修定稿

E-mail：xthyangkaixin@163.com. 通信作者 杨钧烽，E-mail：yangjunfeng@nssc.ac.cn

lites provide the atmospheric temperature, which can be used for the research of the gravity waves. The data from the Microwave Limb Sounder (MLS) on Aura and the Sounding of the Atmosphere using Broadband Emission Radiometry (SABER) on TIMED from 2012 to 2014 are used to study the global distribution characteristics of atmospheric gravity waves at the height of 20～50 km. The gravity wave activities derived from the two observations are similar to each other. Gravity waves change significantly with season, latitude and altitude. Gravity waves at high latitudes in the winter hemisphere are strongest, and that at high latitudes in the summer hemisphere are weakest. There are also obvious gravity wave activities over the equator and the subtropics in the summer hemisphere. The results show that the strength of gravity wave increases with altitude. In general, the value of gravity wave activity intensity derived from TIMED/SABER is greater than that from Aura/MLS.

Key words Satellite data, Aura/MLS, TIMED/SABER, Gravity waves

0 引言

大气重力波是中高层大气主要波动之一,在临近空间环境变化过程中具有重要作用。重力波的传播能够输送能量和动量,对全球大气环流和热力学结构等方面具有重要影响,在对流层、平流层、中间层、热层甚至电离层大气之间的耦合过程中有着至关重要的作用[1–4]。Fritts 和 Alexander[5] 对重力波及其对大气的作用进行了详细描述,总结了大气重力波的动力过程和作用,论述了不同激发源重力波特征和传播特性。但是大气重力波在大气模式的模拟过程中仍无法被准确表征,其参数化方案与实际情况存在一定差异,这影响到模式模拟的准确度[2,4]。因此,对重力波活动特性进行深入观测和分析是十分必要的。

国内外学者利用多种探测手段对重力波进行观测和研究。无线电雷达、激光雷达和气辉成像仪等地基探测设备数据具备站点上空连续时间和高分辨率观测的特点[6–9],能够有效提取站点上空重力波特征,并结合色散关系获得重力波结构,其中气辉成像仪能够获得短波长和短周期重力波。此外,高空火箭和无线电探空仪也是观测大气重力波的重要手段[10–11]。但是这些数据在空间和时间覆盖方面存在不足。卫星数据相比地基和原位探测,具有全球覆盖性广的优点,常被用于全球大气重力波活动研究[12–19]。

Aura 卫星搭载的大气微波临边探测器 MLS(Microwave Limb Sounder)和 TIMED 卫星搭载的大气宽带红外辐射计 SABER(Sounding of the Atmosphere using Broadband Emission Radiometry)均采用了临边探测技术,可以探测临近空间的大气温度等环境要素。本文利用 2012－2014 年共三年的 Aura/MLS 与 TIMED/SABER 温度数据,提取全球范围内垂直波长 2～15 km 的平流层重力波扰动,给出了 30～50 km 高度重力波扰动强度的全球分布状况,同时分析了纬圈平均的重力波活动强度随高度及纬度的变化情况。

1 数据与分析方法

1.1 Aura/MLS 数据

Aura 是由美国喷气推进实验室研制的地球观测卫星,于 2004 年 7 月 15 日发射。Aura 卫星轨道高度 705 km,倾角 98.2°,轨道周期 1.7 h,每天绕地 13～14 圈,每天的探测剖面数约为 3300～3600。Aura 卫星搭载的微波临边探测器 MLS 主要用于测量地球大气临边的微波热辐射,于 2004 年 8 月 13 日开始获取大气温度观测数据。MLS 的温度数据根据与氧原子谱线相近的 118 GHz 和 240 GHz 的两个辐射探测器探测到热辐射结果反演得到[17]。其有效温度廓线覆盖了约 10～92 km 的高度范围,垂直分辨率在 50 km 以下约为 1.3 km, 50 km 以上逐渐增大至约 5 km。空间覆盖的纬度范围为 82°S－82°N,经度范围为 180°W－180°E,相邻观测廓线水平距离约 165 km,时间间隔为 24.7 s[18]。

1.2 TIMED/SABER 数据

热层–电离层–中间层能量和动力学卫星 TIMED 由美国航空与航天局(NASA)研制,于 2001 年 12 月 7 日发射。TIMED 卫星轨道倾角 74.1°,轨道高度约 625 km,轨道周期约 97 min,每 60 天实施一次偏航

机动[19–22]。卫星每天测量 15 轨数据，相邻轨道的经向间距约为 24°，每个轨道约 96 个事件，每天可获得 1000 多条探测廓线。TIMED 卫星搭载了利用宽带发射辐射计的大气廓线测量仪 SABER。SABER 是一个用来测量地球红外临边辐射的十通道红外辐射计。该设备通过测量很宽高度及光谱范围的大气热辐射，获得 15～100 km 的有效大气温度数据[20]。TIMED 卫星进动缓慢，覆盖全球 24 h 地方时需要约 60 天。卫星每 60 天进行一次姿态调整，SABER 在北向观测时覆盖纬度 50°S－82°N，在南向观测时覆盖纬度 82°S－50°N，观测方向垂直于轨道平面[19–22]。

1.3 分析方法

本文分析选取的是 Aura/MLS 卫星数据 V4.2 版本和 TIMED/SABER 卫星数据 V2.0 版本的大气温度等数据，时间为 2012 年 1 月至 2014 年 12 月共 3 年。采用带通滤波方法提取平流层重力波扰动[20,23]。对多年的卫星探测数据进行时间和空间统计，时间划分为四季，12 月到 2 月为冬季，3 月到 5 月为春季，6 月到 8 月为夏季，9 月到 11 月为秋季。区域纬度设定在 80°S－80°N，分辨率为 2°；经度设定在 180°W－180°E，分辨率为 4°。高度设定在 20～50 km。

利用 Aura/MLS 和 TIMED/SABER 温度数据提取平流层背景温度廓线和温度扰动。每个温度廓线可看作由背景温度与扰动值叠加而成[21]。第一步，对于每个探测剖面，在 20～50 km 高度范围，温度参量采用线性插值，高度分辨率归一化为 1 km。第二步，根据季节统计的网格内所有温度廓线平均得到背景温度，每条廓线减去平均值后得到的扰动包含大气重力波、行星波等引起的大气扰动。第三步，在垂直方向上进行 2～15 km 带通滤波，去除其他波动成分，得到垂直波长在 2～15 km 范围内重力波引起的大气扰动[24]。第四步，各网格点内温度扰动值的平均值除以背景温度得到重力波扰动百分比，代表垂直波长 2～15 km 的重力波扰动强度。

2 研究结果

2.1 Aura/MLS 观测全球重力波扰动

图 1 为 Aura/MLS 观测数据分析的 30 km 高度全球重力波扰动强度分布，可以看到 30 km 高度重力波活动强度在不同月份随纬度变化显著。12－2 月份，重力波扰动强度在北半球强，南半球弱。北半球高纬度地区存在较强的重力波扰动，尤其是亚欧大陆、北美洲和大西洋上空。赤道及南半球低纬度地区也存在重力波活动区域。南半球高纬度地区重力波活动最弱。6－8 月份，重力波活动强度在南半球强，北半球弱。南半球高纬度地区存在较强的重力波扰动纬度带，尤其在南美洲南端最强。高纬度地区冬季重力波扰动显著，这与背景风场滤波作用具有密切关

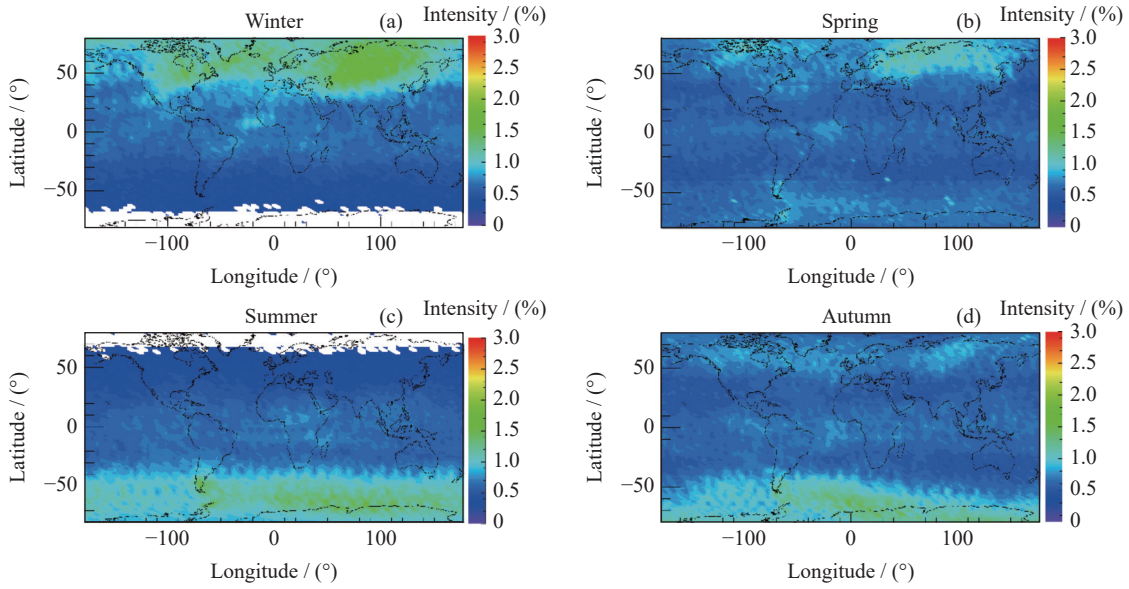


图 1 利用 Aura/MLS 观测数据分析的 30 km 高度全球重力波扰动强度分布

Fig. 1 Global distribution of gravity waves observed by Aura/MLS at 30 km height

系，冬季对流层和平流层盛行西风，而且风速较大，导致更多的低相速度重力波上传到平流层[17]。高纬度重力波波源主要来自于地形、锋面和冬季平流层急流等[19,20]。Wu 等[18] 研究也表明南半球平流层重力波与平流层急流具有很强的相关性，部分区域的重力波则与地形更相关。冬季和夏季重力波扰动强度南北半球分布既有对称性又有所区别。南半球高纬度冬季的重力波活动纬向分布比北半球冬季的纬向分布均匀，这与南半球冬季稳定的极涡和弱行星波有关[19]。

在春秋两季，高纬度地区的重力波活动都大幅度减弱，存在明显的局地性。例如北半球的加拿大北部、乌拉尔山和西伯利亚，以及南半球南美洲南端和南极海岸等地有明显重力波活动区域。Ern 等[20] 研究表明在春秋两季，这些重力波活动区域的山脉地形是主要重力波激发源。

图 2 给出了 Aura/MLS 观测数据分析的 50 km 高度全球重力波扰动强度分布。50 km 高度全球扰动强度分布与 30 km 高度主要特征类似，但 50 km 的各季节高纬度重力波扰动随经度变化幅度比 30 km 的小。冬季北半球重力波活动区域主要集中在北极地区，比 30 km 冬季活动区域的纬度更靠极区。30 km 高纬度局地性的重力波扰动没有随高度增加而增强，可能是由于重力波随着高度增加而不断传播，导致 50 km 重力波活动区域与波源的水平距离越来越大[19]。

图 3 给出根据 Aura/MLS 观测数据分析的纬圈平均重力波扰动随高度和纬度的变化。从图中可知，重力波扰动随季节变化显著。12－1 月北半球高纬度重力波扰动较强，赤道上空次之，其中最大值位于北半球高纬度 45 km 高度。6－8 月南半球高纬度重力波扰动较强，赤道上空次之，其中最大值位于南半球高纬度 45 km 高度，重力波扰动强度分布与冬季基本呈对称相反。春秋季节为冬夏季节的过渡阶段，南北大致对称分布：高纬度和赤道重力波扰动比中纬度地区显著。从图 3 中可明显看出，重力波扰动强度随高度增加，这主要是由于在适合上传的背景风条件下，重力波向上传播逐渐饱和，幅度增长[18]。大气密度随高度指数递减，能量守恒的重力波振幅随高度指数递增，标高约为 14 km，是气压标高的两倍[20]。

2.2 TIMED/SABER 观测全球重力波扰动

图 4 给出了 2012－2014 年 TIMED/SABER 观测数据分析的 30 km 高度全球扰动强度分布结果。从 TIMED/SABER 温度数据中分析得到的重力波扰动与 Aura/MLS 数据得到的强度与全球分布特征都具有较好的一致性。但夏半球低纬度存在几个比 Aura/MLS 观测显著的重力波扰动区域：12－2 月份南半球 20°S 附近南美洲、非洲和北澳大利亚存在强扰动区域；6－8 月份北半球 20°N 附近墨西哥湾、北

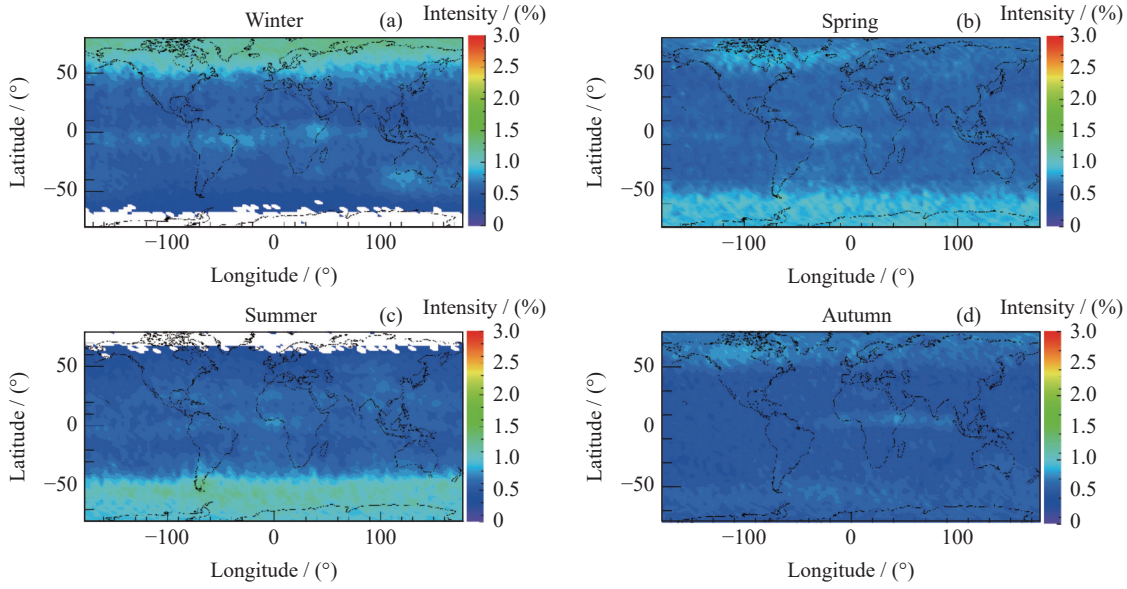


图 2 利用 Aura/MLS 观测数据分析得到的 50 km 高度全球重力波扰动强度分布

Fig. 2 Global distribution of gravity waves observed by Aura/MLS at 50 km height

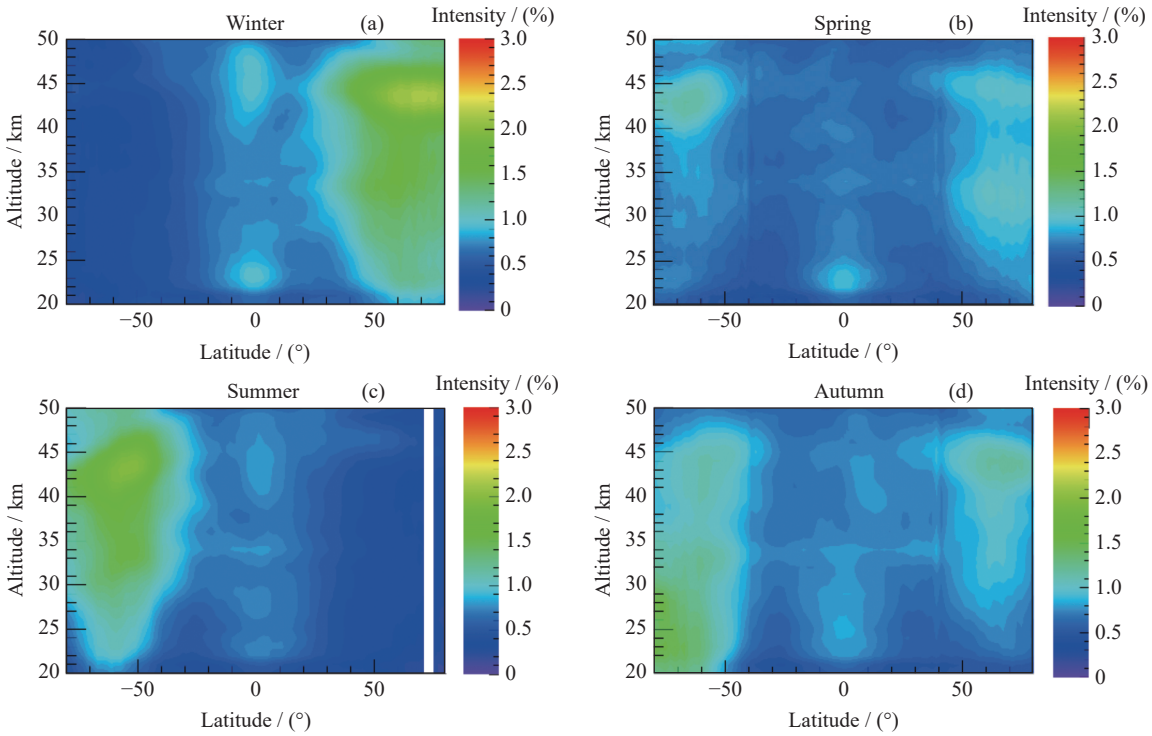


图 3　Aura/MLS 观测数据分析的纬圈平均重力波扰动随高度和纬度的变化

Fig. 3　Latitude-altitude distribution of zonal mean gravity waves observed by Aura/MLS

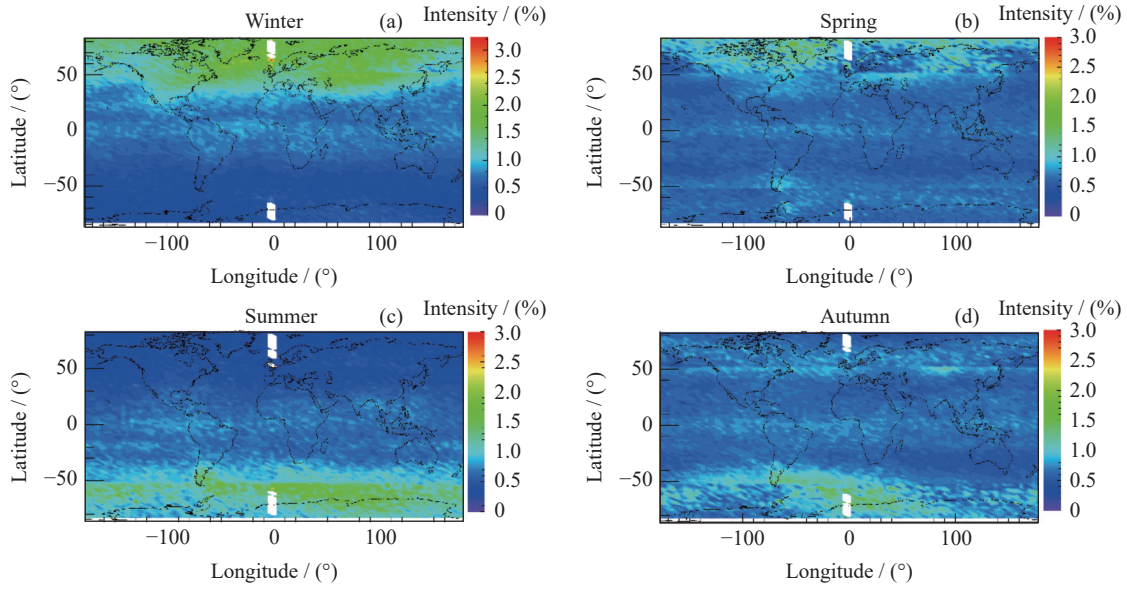


图 4　TIMED/SABER 观测数据分析的 30 km 高度全球重力波扰动强度分布

Fig. 4　Global distribution of gravity waves observed by TIMED/SABER at 30 km height

非和东南亚存在强扰动区域。这些重力波的波源通常来自对流激发，活动区域与季风区域和高海面温度区域密切相关[19,20]。Wu 等[18] 研究表明赤道地区重力波水平波长较长和固有频率较低，与赤道平流层顶冰水含量和深对流有密切关系。此外，赤道上空低平流层重力波活动也与赤道平流层准两年振荡 QBO(Quasi-Biennial Oscillation)有关，当重力波纬向传播(东向或西向)时，QBO 纬向风变化能够调制

重力波是否上传[18,21]。春秋两季山脉地形引起的重力波扰动的区域特征也更为显著。

图 5 给出了 2012－2014 年 TIMED/SABER 观测数据分析的 50 km 高度全球重力波扰动强度分布结果。全球重力波扰动分布特征与 Aura/MLS 结果基本一致，但 TIMED/SABER 观测的 50 km 重力波扰动振幅在高纬度地区和赤道地区比 Aura/MLS 的振幅略大。

图 6 给出根据 TIMED/SABER 观测数据分析的纬圈平均扰动随高度和纬度的变化。重力波活动强度在冬季半球高纬度地区强于夏季半球高纬度地区。冬季半球高纬度地区是重力波活动的强纬度带，赤道地区为次极大纬度带。图 6 在南北纬 52°存在部分不连续，这主要是由于 TIMED 卫星姿态调整，SABER 观测数据覆盖范围变化所致。TIMED/SABER 温度提取的重力波扰动分布特征与图 3 的 Aura/MLS 观测结果类似，高纬度和赤道上空重力波扰动强度随高度递增。总体而言，前者比后者的振幅数值略大。

2.3 分析讨论

目前被广泛使用的从卫星温度数据中提取重力波方法是去除全球尺度的背景大气和带通滤波两种方法，不同研究也可能对其进行适当调整[20,23]。采用同一方法提取重力波，造成的差异主要来自不同卫星对重力波波谱的敏感性[23]。Aura/MLS 具有较窄的束宽，以天底角 66°对地观测，对相位平行于观测视线的波动较为敏感。TIMED/SABER 则具有较长的观测路径和较窄的视场，因此具有较高的垂直分辨率和较粗的水平分辨率。相比 Aura/MLS，TIMED/SABER 对λ_z/λ_h（垂直波长和水平波长比值）较小的重力波较为敏感[18]。在本研究结果中也可看出，Aura/MLS 和 TIMED/SABER 温度数据提取的重力波扰动分布基本一致，存在一些细微差异。

Aura/MLS 的辐射数据也可用于重力波特征研究[17,18]。Wu 等[17] 从 Aura/MLS 的 118 GHz 单通道 40 个饱和辐射数据中分析$\lambda_z > 5$ km和$\lambda_h \in 100 \sim 200$ km的重力波全球分布。从辐射数据中提取的重力波纬圈分布与图 3 分布基本一致，但温度数据提取的夏半球低纬度季风区域的重力波没有辐射数据提取的重力波显著。Wu 等[17] 认为利用辐射数据分析重力波的方法与温度数据分析重力波方法存在显著区别，前者利用了 118 GHz 单通道 40 个饱和辐射数据，而温度反演过程中利用多通道不饱和辐射数据来获得随高度变化的温度廓线。

Preusse 等[19] 利用去除纬向波数 0～6 波动的方法从 SABER 温度数据中提取全球重力波温度变化。Ern 等[20] 通过去除全球背景温度的方法分析了 SABER 数据中 20～100 km 重力波动量通量的季节

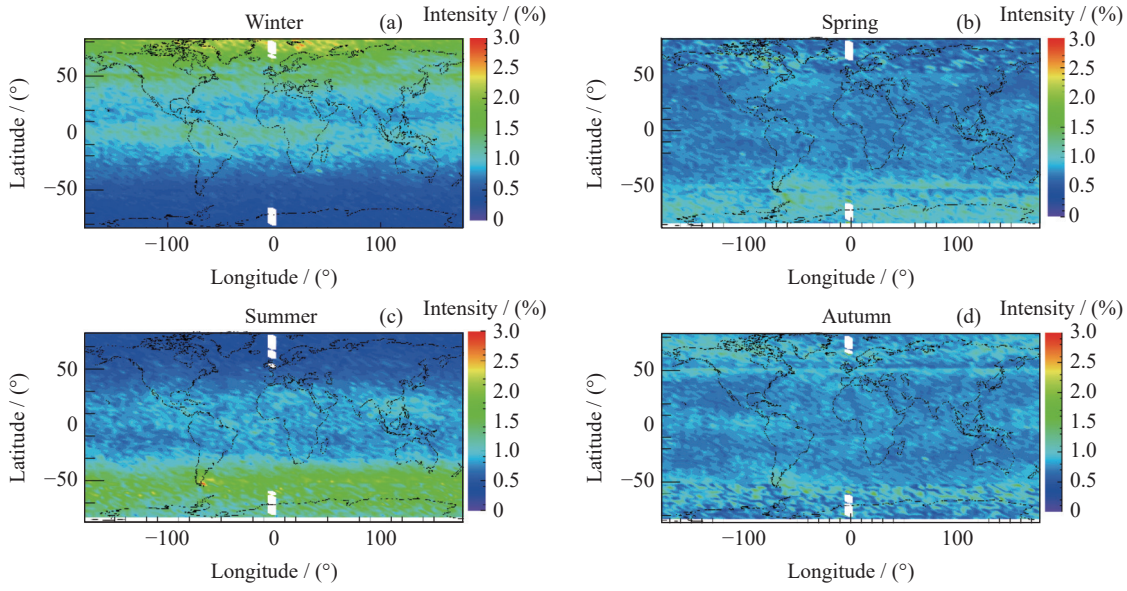


图 5 TIMED/SABER 观测数据分析的 50 km 高度全球重力波扰动强度分布

Fig. 5 Global distribution of gravity waves observed by TIMED/SABER at 50 km height

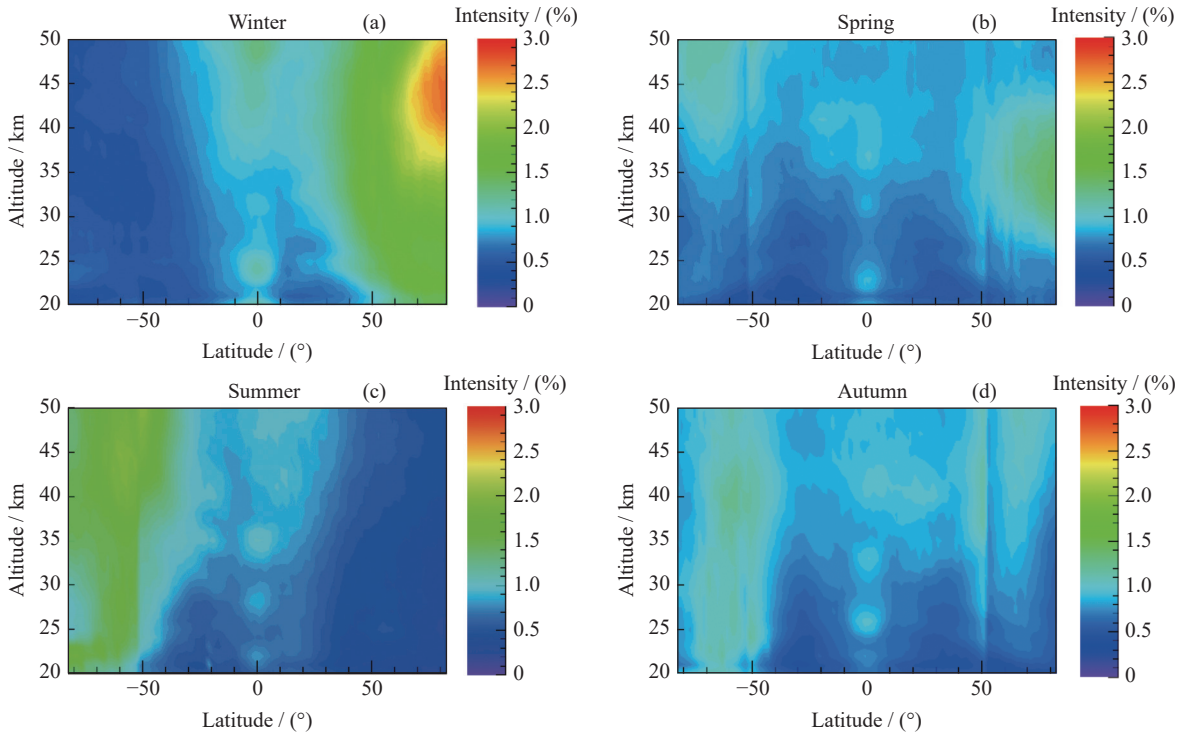


图 6　TIMED/SABER 观测数据分析的纬圈平均扰动随高度和纬度的变化

Fig. 6　Latitude-altitude distribution of zonal mean gravity waves observed by TIMED/SABER

变化和全球分布，并且与 HIRDLS（High Resolution Dynamics Limb Sounder）平流层重力波进行比较。Zhang 等[21] 利用带通滤波的方法从 SABER 温度数据中提取平流层 2～10 km 波长的平流层重力波势能。John 等[23] 比较了去除纬向波数 0～6 波动和带通滤波两种方法从 SABER 温度探测数据提取重力波的差异，前者的重力波势能是后者的 4 倍左右。这些研究结果采用的方法和重力波参量各不相同，从不同的角度对重力波活动的全球分布角度进行了分析。

本文采用带通滤波方法从 Aura/MLS 和 TIMED/SABER 温度数据中提取的重力波分布特征与其他研究结果基本一致。存在的一些细微差别除来自于提取方法不同之外，也可能与 QBO 和年际变化等有关。Zhang 等[21] 研究表明 QBO 纬向风为西风时，对流层和平流层盛行西风，更多的东向传播重力波上传至平流层，导致平流层重力波势能明显增强；当纬向风由西转东时，部分东传的重力波被背景风滤除，平流层重力波势能显著下降。2013 年 1 月北半球也出现平流层爆发性增温（Stratospheric Sudden Warming, SSW），SSW 可能对冬季高纬度重力波有一定影响[25]。尽管如此，冬季高纬度重力波仍然主要受极涡背景环流的滤波影响[26]。

3　结论

利用带通滤波的方法从 2012－2014 年两种临边探测手段（Aura/MLS 和 TIMED/SABER）观测的临近空间大气温度数据中获取垂直波长在 2～15 km 范围的大气重力波，分析了其全球分布特征随季节的变化，二者主要特征基本一致。重力波表现出随季节和纬度的显著变化：冬季半球高纬度重力波扰动较强；赤道、夏季半球的近赤道区域次强；夏季半球高纬度地区几乎无重力波活动。北半球冬季重力波扰动在亚欧大陆、北美洲和大西洋上空较强，而南半球冬季重力波扰动强度除在南美洲南端比较强之外，其随经度变化分布相对比较均匀。夏季半球近赤道区域的重力波活动受季风和对流的影响，具有显著局地性。在春秋分，重力波活动区域受地形影响明显。重力波扰动强度随高度增加呈现增强的现象。50 km 高度冬季半球重力波活动区域也有向极区移动的趋势。TIMED/SABER 中重力波扰动强度数值比 Aura/MLS 的略大。

参考文献

[1] SMITH A K. Global dynamics of the MLT[J]. *Surveys in Geophysics*, 2012, **33**(6): 1177-1230

[2] LÜ Daren, CHEN Zeyu, GUO Xia, *et al*. Recent progress in near space atmospheric environment study[J]. *Advances in Mechanics*, 2009, **39**(6): 674-682

[3] WAN Weixing, XU Jiyao. Recent investigation on the coupling between the ionosphere and upper atmosphere[J]. *Science China Earth Sciences*, 2014, **44**(9): 1863-1883 (万卫星, 徐寄遥. 中国高层大气与电离层耦合研究进展[J]. 中国科学: 地球科学, 2014, **44**(9): 1863-1883)

[4] LIU H L, MCINERNEY J M, SANTOS S, *et al*. Gravity waves simulated by high-resolution Whole Atmosphere Community Climate Model[J]. *Geophysical Research Letters*, 2014, **41**(24): 9106-9112

[5] FRITTS D C, ALEXANDER M J. Gravity wave dynamics and effects in the middle atmosphere[J]. *Reviews of Geophysics*, 2003, **41**(1): 1003

[6] TIAN C X, HU X, LIU A Z, *et al*. Diurnal and seasonal variability of short-period gravity waves at ~40° N using meteor radar wind observations[J]. *Advances in Space Research*, 2021, **68**(3): 1341-1355

[7] BA Jin, YAN Zhaoai, HU Xiong, *et al*. Characteristics of vertical wind perturbations in the mesopause region based on lidar measurements and dynamic simulations[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2017, **37**(5): 554-563 (巴金, 闫召爱, 胡雄, 等. 基于激光雷达实测和动力学仿真方法研究中间层顶垂直风扰动特性[J]. 空间科学学报, 2017, **37**(5): 554-563)

[8] TU Cui, HU Xiong, YAN Zhaoai, *et al*. First imaging observation of the gravity waves in the mesopause region in China[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2010, **55**(6): 539-543

[9] 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

[10] WANG Bo, HU Xiong, XIAO Cunying, *et al*. Characteristics of quasi-monochromatic inertia gravity waves revealed by first meteorological rocket data of the Meridian Space Weather Monitoring Project[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2017, **37**(5): 547-553 (王博, 胡雄, 肖存英, 等. 子午工程首次火箭探空数据准单色惯性重力波特性分析[J]. 空间科学学报, 2017, **37**(5): 547-553)

[11] ZHANG S D, YI F, HUANG C M, *et al*. Latitudinal and altitudinal variability of lower atmospheric inertial gravity waves revealed by U. S. radiosonde data[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2013, **118**(14): 7750

[12] CHEN Hongbin. An overview of the space-based observations for upper atmospheric research[J]. *Advances in Earth Science*, 2009, **24**(3): 229-241 (陈洪滨. 中高层大气研究的空间探测[J]. 地球科学进展, 2009, **24**(3): 229-241)

[13] JIANG J H, ECKERMANN S D, WU D L, *et al*. Seasonal variation of gravity wave sources from satellite observation[J]. *Advances in Space Research*, 2005, **35**(11): 1925-1932

[14] 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

[15] GONG J, WU D L, ECKERMANN S D. Gravity wave variances and propagation derived from AIRS radiances[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2012, **12**(4): 1701-1720

[16] 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)

[17] 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

[18] 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

[19] 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

[20] ERN M, PREUSSE P, GILLE J C, *et al*. Implications for atmospheric dynamics derived from global observations of gravity wave momentum flux in stratosphere and mesosphere[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2011, **116**(19): D19107

[21] ZHANG Y, XIONG J, LIU L, *et al*. A global morphology of gravity wave activity in the stratosphere revealed by the 8-year SABER/TIMED data[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2012, **117**(D21): D21101

[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] JOHN S R, KUMAR K K. A discussion on the methods of extracting gravity wave perturbations from space-based measurements[J]. *Geophysical Research Letters*, 2013, **40**(10): 2406-2410

[24] GUO Wenjie, HU Xiong, YAN Zhaoai, *et al*. Terrain-generated gravity waves in the upper stratosphere detected by Rayleigh lidar[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2015, **58**(10): 3481-3486 (郭文杰, 胡雄, 闫召爱, 等. 利用瑞利激光雷达观测北京地区上平流层地形重力波活动[J]. 地球物理学报, 2015, **58**(10): 3481-3486)

[25] YANG J F, XIAO C Y, HU X, *et al*. Responses of zonal wind at ~40°N to stratospheric sudden warming events in the stratosphere, mesosphere and lower thermosphere[J]. *Science China Technological Sciences*, 2017, **60**(6): 935-945

[26] JIA Y, ZHANG S D, YI F, *et al*. Observations of gravity wave activity during stratospheric sudden warmings in the Northern Hemisphere[J]. *Science China Technological Sciences*, 2015, **58**(6): 951-960