0254-6124/2021/41(6)-911–09 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

HUANG Chouyue, ZHANG Shaodong, HUANG Chunming, HUANG Kaiming, GONG Yun. Statistical characteristics of stratospheric mountain waves over Southern Andes based on AIRS observations (in Chinese). *Chin. J. Space Sci.*, 2021, **41**(6): 911-919. DOI:10.11728/cjss2021.06.911

安第斯山上空平流层山地波统计特征的 AIRS 观测研究*

黄丑月 张绍东 黄春明 黄开明 龚 韵

(武汉大学电子信息学院 武汉 430072)

摘 要 利用 AIRS 红外探测仪在 2013—2018 年的辐射测量数据, 对安第斯山 20 km, 27 km, 35 km 及 41 km 高度的山地波进行个例研究和统计分析. 观测结果表明安第斯山上空山地波主要发生在 5—10 月, 月平均水平波长、垂直波长及动量通量均没有明显的年际变化. 水平波长在 5 月和 10 月相比 6—9 月较小, 垂直波长和动量通量 5—7 月逐渐升高, 达到峰值后在 8—10 月逐渐下降. 在 20~41 km 范围内, 水平波长从 43.5~53.9 km 缓慢升高至 89.3~176.8 km, 垂直波长从 7.4~14.7 km 上升至 7.4~29.7 km, 动量通量由 376.0~801.3 mPa 显著下降至 10.4~239.3 mPa. 总体而言, 山地波在向上传播的过程中, 水平波长缓慢增加, 在逆风传播的情况下, 受到背景风场影响垂直波长随高度升高而增大. 动量通量随高度升高显著下降, 说明安第斯山山地波向上传播的同时伴有强烈耗散, 耗散的能量将储存在背景大气中, 对高平流层甚至中间层产生重要影响.

关键词 山地波, AIRS, 安第斯山, 平流层

中图分类号 P 352

Statistical Characteristics of Stratospheric Mountain Waves over Southern Andes Based on AIRS Observations

HUANG Chouyue ZHANG Shaodong HUANG Chunming

HUANG Kaiming GONG Yun

(*Electronic Information School, Wuhan University, Wuhan* 430072)

Abstract Using the radiation measurement data of the Atmospheric Infrared Sounder (AIRS) on the Aqua satellite from 2013 to 2018, case studies and statistical analysis of mountain waves at 20 km, 27 km, 35 km, and 41 km in the Andes are carried out. Observation results show that the mountain waves over the Andes from 2013 to 2018 mainly occur from May to October, and the monthly average horizontal wavelength, vertical wavelength, and momentum flux have no obvious interannual changes.

* 国家自然科学基金项目资助 (41874177)

2021-08-29 收到原稿, 2021-10-11 收到修定稿

E-mail: huang_cy@whu.edu.cn. 通信作者 张绍东, E-mail: zsd@whu.edu.cn

The horizontal wavelength decreases slightly in May and October compared to June to September. The vertical wavelength gradually increases from May to June and reaches its peak in July. Then it decreases from August to October. The momentum flux shows a similar seasonal changes pattern as the vertical wavelength. In the range of 20 km to 41 km, the horizontal wavelength slowly increases from 43.5∼53.9 km to 89.3∼176.8 km. Affected by the background wind field, the vertical wavelength increases with height, from 7.4∼14.7 km at 20 km to 7.4∼29.7 km at 41 km. The momentum flux ranges from 376.0∼801.3 mPa at 20 km and drops to 10.4∼239.3 mPa at 41 km. In general, the horizontal wavelength of the mountain waves increases slowly with height as it propagates upward, and the vertical wavelength increases with height under the influence of the background wind field in the case of upstream propagation. The momentum flux decreases significantly with height, indicating that the Andes mountain waves propagate upward while accompanied by strong dissipation. The dissipated energy will be stored in the background atmosphere, which will have an important impact on the upper stratosphere and even the mesosphere.

Key words Mountain wave, AIRS, Andes, Stratosphere

0 引言

大气重力波对地球大气的天气和气候学变化有着重要影响. 重力波通过从低层向高层大气传播传输能量和动量, 进一步影响中层大气热结构和环流 [1,2]. 山地波是重力波中的重要一种, 由分层的气流掠过地形障碍产生. 山地波可以传播到平流层, 并在平流层破碎引起湍流, 产生风拖曳影响大气动量通量收支. 此外, 山地波还会促进极区平流层云和臭氧层空洞的形成 [3].

以往进行中平流层观测的星载探测仪由于分辨率较低无法提取重力波, 目前的高分辨率探测仪为研究重力波激发、传播和耗散提供了帮助. Preusse 等 [4] 利用大气低温红外光谱仪和望远镜 (CRISTA) 研究平流层山地波的波动参数. Eckermann 等 [5] 利用高级微波探测装置 (ASMU-A) 对斯堪的纳维亚长山地波的水平温度结构进行研究. Alexander 等 [6] 利用高分辨率动力学临边探测仪 (HIRDLS) 估计了全球重力波动量通量.

AIRS 大气红外探测仪进一步丰富了山地波的研究. Kumar 等 [7] 利用 AIRS 分析了喜马拉雅山一次大振幅地形波的三维结构. Gong 等 [8] 研究了重力波的方差及传播方向. Alexander 等 [9] 分析了南极半岛地形波的波动参数. Hoffman 等 [10] 利用 AIRS 统计了全球平流层重力波热点地区.

安第斯山地区上空是全球最重要的重力波热点区域. 安第斯山是国际上最长的大陆山脉, 从南美洲北部一直延伸到大陆的最南端 (11°N−53°S), 长约 7240 km, 宽约 200∼700 km, 平均高度约 4000 m, 最高峰阿根廷阿空加瓜山海拔高度约 6961 m, 是亚洲之外最高的山峰. 安第斯山顶部和上空以纬向环流为主, 强西风与温带安第斯山脉 (37°S 以南) 的相互作用能够产生大振幅重力波, 波动传播到平流层并产生动量沉积 [11]. 对该区域波动的研究有利于深刻理解山地波的基本特征及其对平流层和中间层大气的影响. 本文利用大气红外探测仪辐射数据, 提取安第斯山地区平流层重力波扰动, 计算安第斯山山地波的波动参数, 分析波动垂直传播特征. 在此基础上对 2013 至 2018 年 5−10 月期间安第斯山山地波的水平波长、垂直波长以及动量通量的月平均值进行统计分析, 讨论了波动参数的高度变化和季节变化.

1 数据和分析方法

2002 年 5 月 4 日地球观测系统 (EOS) 中的 Aqua 卫星成功发射. 作为 A-train 极轨卫星集群中的一员, Aqua 卫星在高度 705 km 的太阳同步轨道运行, 每天于固定时间穿越赤道, 其上升和下降轨道的赤道穿越时间分别为 13:30 UT 和 01:30 UT[12]. AIRS 大气红外探测仪搭载于 Aqua 卫星上, 其采用天底观测的测量几何, 星下点水平方向分辨率为 13.5 km×13.5 km, 扫描边缘为 41 km×21.4 km. AIRS

每隔 2.67 s 进行一次交叉扫描, 扫描角度为 ±49.5°, 一次扫描包含 90 个足迹, 这些足迹在地面上的投影覆盖 1650~1700 km 的跨轨距离, 两次扫描沿轨道方向距离约为 18 km.

AIRS 包含 2378 个光谱吸收通道, 覆盖 3.74~4.61 μm、6.20~8.22 μm 和 8.8~15.4 μm 波段, 标定光谱分辨率为 $\lambda/\Delta\lambda = 1200$. 其中 15 μm 和 4.3 μm CO_2 吸收带对大气温度敏感, 可用来获取大气温度扰动特征 [13]. AIRS 无法检测到垂直波长小于通道加权函数半峰宽的重力波 [14]. 15 μm 波段通道权重函数半峰宽约 13 km, 可以捕捉到垂直波长在 13 km 以上的波动. 4.3 μm 波段通道半峰宽大于 15 km, 仅对垂直波长在 15 km 以上的波动更加敏感, 而且 4.3 μm 波段的辐射测量结果在白天会受到非局域热力学平衡 (non-LTE) 效应的影响, 无法反映大气温度的实际扰动 [14−16].

本次研究中选择了 15 μm 波段的 667.78 $\mathrm{cm^{-1}}$, 668.54 $\mathrm{cm^{-1}}$, 667.28 $\mathrm{cm^{-1}}$, 670.83 $\mathrm{cm^{-1}}$ 4 个通道进行重力波参数化分析. 通道的加权函数分别在 41 km, 35 km, 27 km 以及 20 km 处达到峰值. 这 4 个通道加权函数在垂直方向上的重叠相对较小, 适合区分不同高度的重力波特征. 检测山地波时使用了 4.3 μm 波段 42 个通道平均结果.

从辐射数据中提取重力波扰动时, 利用四阶多项式拟合消除临边增亮效应和缓慢变化的背景信号 [14,17]. 本研究中使用的 AIRS 1B 校准辐射数据将 6 min 内 135 次扫描采集的测量数据包装在一个数据包中, 结合数据包中 90×135 个瞬时视场数据, 可以通过小波分析 [13] 提取重力波振幅及波长.

2 山地波个例分析

山地波是一种重要的重力波, AIRS 可以观测到平流层山地波局地温度扰动的特征变化. 在已有的研究中, 安第斯山地区曾观测到大量山地波, 被卫星观测认为是全球重力波的热点地区 [18]. AIRS 红外辐射数据研究发现, 2016 年 7 月 22 日 05:47 UT 在安第斯山脉南部地区观测到一次强烈的重力波活动. 根据普朗克定律将 AIRS 特定通道辐射数据转换的亮温数值, 结合重力波扰动提取方法, 得到 4 个 15 μm 波段的亮温扰动情况, 如图 1 所示. 图 1(a)~(c) 中可以看到明显的山地波弓形结构, 图 1(d) 中的波动幅度较小, 波动结构相对其他高度模糊, 这可能是因为 20 km 高度处垂直波长低于 15 μm 通道权重函数半峰宽 13 km 的波动成分无法观测到.

利用 ST 变换和交叉谱 [13] 对数据包进行波动参数提取. Alexander 等 [13] 提出的频谱分析方法只能推导出跨轨和沿轨方向的波数向量, 由于卫星轨道与经线, 扫描方向与纬线不完全平行, 因此得到的水平波数有一定误差. 为更准确地估计水平波长, Sato 等 [19] 提出一种方法, 将跨轨和沿轨方向波数向量投影到笛卡儿坐标, 得到水平波数分量 (k,l), 其中 k 代表纬向波数, l 代表经向波数. 采用这种方法得到图 1(a) 中波动的局部特征, 结果如图 2 所示. 重力波活动亮温振幅超过 4 K, 振幅最高达到 14.7 K, 波峰位于安第斯山脉东侧. 图 2(c) 表明波动的水平波长在大部分区域约为 200~300 km, 而波动中心的水平波长为 65 km. 在逆风传播的假设下 [2], 波包向西偏南 20° 方向传播. 由于 AIRS 辐射测量的限制, 单通道测量无法直接得到波动的垂直结构, 因此在计算波动的垂直波长时, 假设观测波动符合山地波水平相速度为 0 的特征 [19], 通过色散关系 [20,21] 得到此次安第斯山山地波的垂直波长为

$$\lambda_z = 2\pi\Big(\frac{N^2}{U^2} - k_\mathrm{h}^2 - \frac{1}{4H_\mathrm{s}^2}\Big)^{-1/2}.$$

其中, λ_z 表示垂直波长, U 表示背景水平风在波传播方向的投影; $k_\mathrm{h} = \sqrt{k^2+l^2}$ 表示水平波数, 其中 $\boldsymbol{k}$ 与 $\boldsymbol{l}$ 分别为纬向和经向波数; H_s 表示密度标高, 取为 8 km; N 表示浮力频率, 通过

$$N^2 = \frac{g}{\bar{T}}\Big(\frac{\partial\bar{T}}{\partial z} + \frac{g}{c_\mathrm{p}}\Big)$$

计算得到. 其中, g 表示重力加速度, $\bar{T}$ 表示背景大气温度, z 表示高度, $c_\mathrm{p} = 1.003\,\mathrm{kJ/(kg{\cdot}K)}$, 背景风场从 HWM14[22] 模式数据中获取, 背景大气温度为 MSISE-00[23] 模式数据.

动量通量 [24] 可以通过

$$(F_x, F_y) = \frac{\bar{\rho}\lambda_z(k,l)}{4\pi}\Big(\frac{g}{N}\Big)^2\Big(\frac{\hat{T}_\mathrm{a}}{\bar{T}}\Big)^2$$

计算得到, 其中 F_x, F_y 代表纬向和经向动量通量, $\bar{\rho}$ 和 $\bar{T}$ 分别代表背景大气密度与温度, 均由 MSISE-00 模式数据得到. $\hat{T}_\mathrm{a}$ 代表实际温度振幅, 可以通过亮温振幅得到, 实际温度振幅与亮温振幅之间的响应关系在文献 [17] 中提到.

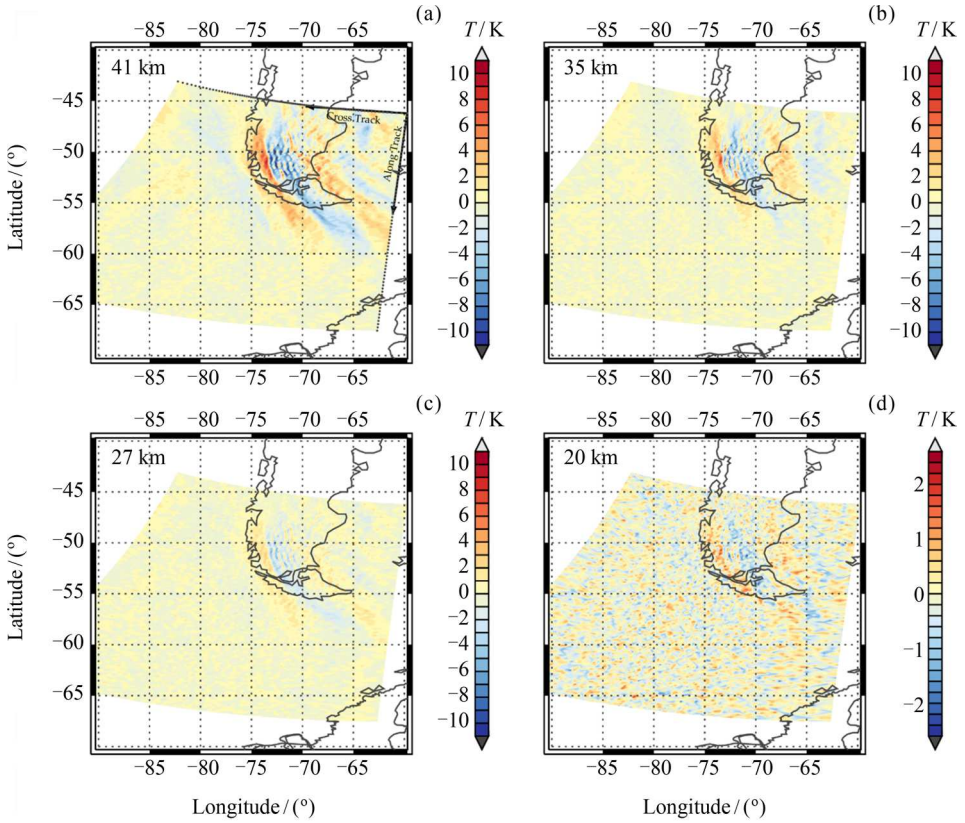

图 1 2016 年 7 月 22 日 05:47 UT 安第斯山 AIRS 辐射测量数据得到的亮温扰动, 使用的通道为 667.78 cm^{-1} (a), 668.54 cm^{-1} (b), 667.28 cm^{-1} (c), 670.83 cm^{-1} (d), 加权函数峰值分别在 41 km, 35 km, 27 km, 20 km. (a) 中箭头标明沿轨和跨轨方向

Fig. 1 Brightness temperature perturbation over southern Andes derived from the radiance measurement for AIRS overpass on 22 July 2016 at 05:47 UT. The spectral channels applied here are 667.78 cm^{-1} (a), 668.54 cm^{-1} (b), 667.28 cm^{-1} (c), and 670.83 cm^{-1} (d), respectively. The weighting functions of these channels peak at 41 km, 35 km, 27 km and 20 km, respectively. The arrows in (a) indicate the along track and cross track directions

用该方法计算图 1 中各高度的重力波参数. 表 1 列出了波动中心的波动参数, 结果表明此次重力波活动的水平波长约 50 km, 振幅从 20 km 处的 2.5 K 增长至 41 km 处的 12.3 K, 这是由于大气密度随高度升高而降低, 振幅随高度升高而增加. 垂直波长在平流层同样随着高度升高而增加, 在 20~41 km 高度, 垂直波长从 10.8 km 增长至 34.3 km, 这可能是由于山地波在向上传播的过程中为逆风传播, 风场 Doppler 效应导致垂直波长增加. 已有研究中, Alexander 等 [25] 利用 AIRS 红外探测仪和 HIRDLS 高分辨率动力学临边探测仪观测到 2006 年 5 月 8 日一次安第斯山地形波事件在平流层高度垂直波长约为 15~20 km, Wright 等 [26] 同样利用 AIRS 红外探测仪观测到 2008 年 5 月 6 日的安第斯山重力波事件平流层垂直波长为 14~18 km, 重力波事件的波动尺度与已有的研究一致, 受到 2016 年 7 月平流层上部局地风场增强作用的影响, 本文

表 1 图 1 中重力波事件在不同高度的山地波波动振幅、水平波长、垂直波长及动量通量

Table 1 Wave amplitude, horizontal wavelength, vertical wavelength, and momentum flux for the mountain wave event in the AIRS overpass in Figure 1

海拔高度/km	振幅高度/K	水平波长/km	垂直波长/km	动量通量/Pa
41	12.3	65.7	34.3	2.30
35	9.3	55.0	22.0	3.39
27	5.9	40.3	16.4	11.30
20	2.5	42.7	10.8	4.64

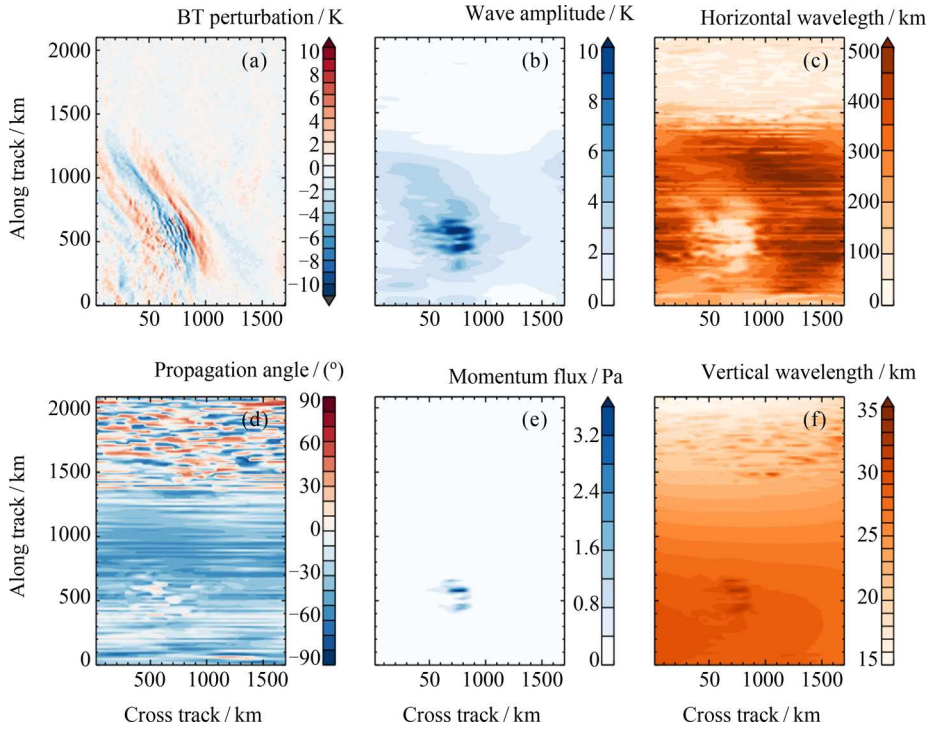

图 2　图 1(a) 中 AIRS 在卫星掠过安第斯山时探测到的重力波波动参数. 其中传播方向 0° 对应西向传播, 90° 和 −90° 分别对应北向和南向传播. 图 1 中数据映射到正交平面中, 坐标平面中 (0, 0) 位置对应图 1 中东北端 (下降轨观测数据)

Fig. 2　Wave parameters of the gravity wave event for the AIRS satellite overpass illustrated in Figure 1(a). Propagation angle 0° corresponds to the westward propagation, and 90° and −90° correspond to the northward and southward propagation respectively. Granule data are mapped into orthogonal plane, where (0, 0) correspond to the most northeastern point of the granule in Figure 1 (descending orbit)

观测的地形波垂直波长相对较长. 20~27 km 高度动量通量从 4.64 Pa 增大至 11.30 Pa, 当波动向上传播至 41 km 高度时, 动量通量降低至 2.30 Pa, 说明在 27~41 km 高度山地波向上传播的过程中伴随着强烈耗散.

图 3 给出了山地波的垂直传播特征, 其本征频率 $\hat{\omega}$ 利用色散关系得到, 有

$$\hat{\omega}^2 = \frac{N^2(k^2+l^2) + f^2\left(m^2 + \dfrac{1}{4H_s^2}\right)}{k^2+l^2+m^2}.$$

其中 m 代表垂直波数, $f = 2\Omega\sin\varphi$ 为 Coriolis 参数, Ω 为地球自转角速度, φ 为地理纬度.

利用波数向量 (k,l,m) 推导出 20~41 km 高度的本征频率分别为 $4.3\times10^{-3}\,\mathrm{rad\cdot s^{-1}}$, $9.2\times10^{-3}\,\mathrm{rad\cdot s^{-1}}$, $9.3\times10^{-3}\,\mathrm{rad\cdot s^{-1}}$ 和 $9.9\times10^{-3}\,\mathrm{rad\cdot s^{-1}}$. 结合 35 km 高度本征频率和水平风场速度 $u = 85.7\,\mathrm{m\cdot s^{-1}}$, $v = -14.5\,\mathrm{m\cdot s^{-1}}$. 通过 Doppler 频移效应 $\hat{\omega} = \omega - ku - lv$ (其中 ω 代表地基频率, u, v 分别代表纬向风和经向风) 计算 35 km 高度处地基频率 ω 为 $4.79\times10^{-5}\,\mathrm{rad\cdot s^{-1}}$.

假设地基频率在整个高度范围内保持恒定, 水平波长随高度缓慢线性变化, 可以推算出如图 3(b)(c) 所示的本征频率和垂直波长剖面. 图 3 结果显示, 在 20~43 km 高度范围内, 纬向风迅速增强, 在逆风传播条件下使得本征频率增加, 20 km 处为 $5.1\times10^{-3}\,\mathrm{rad\cdot s^{-1}}$, 27 km 处为 $8.3\times10^{-3}\,\mathrm{rad\cdot s^{-1}}$, 而 41 km 处为 $1.07\times10^{-2}\,\mathrm{rad\cdot s^{-1}}$, 与相应高度观测数据推导结果接近. 本征频率的增加引起垂直波长增加, 20 km 高度处垂直波长理论值为 10.2 km, 27 km 处为 15.9 km, 41 km 处为 36.7 km, 这与表 1 中的观测结果非常吻合. 这说明在 4 个高度上观测到的重力波确实是同一个重力波事件, 也证实地形激发山地波可以向上传播到中间层, 影响中间层大气动力学过程. 低平流层 20 km 高度处垂直波长的估算结果和观测结果分别为 10.2 km, 10.8 km, 由于 AIRS 无法观测到垂直波长低于 13 km 的波动, 也说明图 1(d) 中

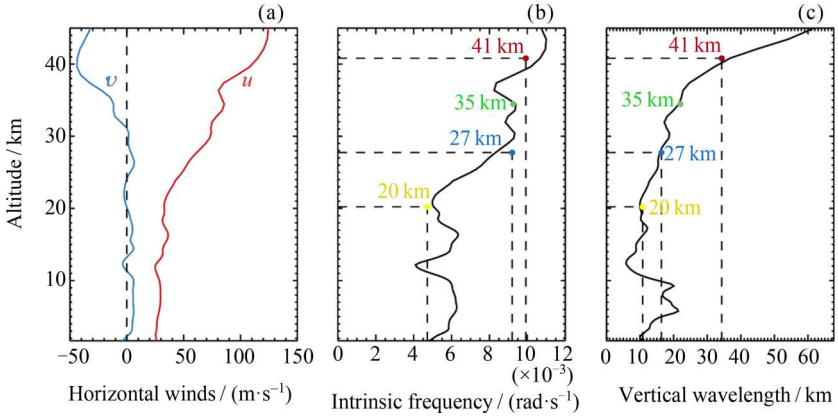

图 3 (a) 图 1 中重力波事件发生期间纬向风和经向风剖面, (b) 计算得到的图 1 中重力波事件本征频率随高度变化, (c) 计算得到的图 1 中重力波事件垂直波长随高度变化

Fig. 3 (a) Profile of the zonal and meridional wind during the gravity wave event in Figure 1, (b) the vertical profile of the intrinsic frequency of the gravity wave event in Figure 1, (c) the vertical profile of the vertical wavelength of the gravity wave event in Figure 1

20 km 高度处只有相对微弱的扰动.

3 安第斯山山地波参数统计

对 2013−2018 年山地波的水平波长、垂直波长及动量通量进行了统计. 利用 Hoffmann 等 [10] 提出的方法检测山地波, 结果显示在 1−4 月及 11−12 月只检测到极少量山地波的发生, 因此这里仅给出 5−10 月山地波参数的统计结果. 图 4 为 2013−2018 年 5−10 月安第斯山山地波月平均水平波长的统计结果, 图中显示安第斯山山地波水平波长没有显著的年际变化特征, 其季节平均值在 20 km 高度处约为 43.5~53.9 km, 27 km 处为 53.3~ 119.2 km, 35 km 处约为 57.6~109.5 km, 41 km 处约为 89.3~176.8 km. 从图 4 中可以看出, 在 20~ 27 km 高度, 水平波长上升; 27~35 km 高度, 5−6 月水平波长有所下降, 7−10 月两个高度水平波长比较接近; 35~41 km 高度, 水平波长在 5−10 月整体有所升高. 水平波长在 6−9 月没有明显的月变化, 但是在 27~41 km 高度, 5 月和 10 月均呈现明显下降趋势, 其中在 27 km 高度 6 月达到峰值 119.2 km, 5 月和 10 月分别降低至 92.4 km 和 53.3 km. 年平均水平波长在 35 km 高度从 7 月的峰值 109.5 km 降低至 5 月的 57.6 km 和 10 月的 65.4 km; 同样在 41 km 高度, 水平波长年平均值在 8 月达到峰值 176.8 km, 而 5 月和 10 月分别降至 132.6 km 和 89.3 km.

图 5 给出了 2013−2018 年 5−10 月山地波月平均垂直波长的变化, 其同样没有明显的年际变化, 其中 20 km 高度处垂直波长为 7.4~14.7 km, 27 km 处为 7.8~18.7 km, 35 km 处为 6.3~25.3 km, 41 km 处为 7.4~29.7 km. 5−9 月垂直波长从高度 20 km 至 41 km 呈升高趋势; 10 月垂直波长高度变化较小, 从 20 km 处的 8.7 km 变为 41 km 处的 7.4 km. 这可能是由于 5−9 月平流层西风随高度增加, 而波动逆风传播, 因此垂直波长随高度增加; 10 月平流层纬向风高度变化较小, 山地波垂直波长没有明显的高度变化. 总体而言, 在 5−7 月, 山地波垂直波长逐渐增大并在 7 月达到峰值; 8−10 月垂直波长逐渐下降, 在 20 km 和 27 km 高度处 8 月与 7 月的垂直波长接近, 表现出与水平波长类似的季节变化特征.

图 6 给出月平均动量通量的季节和高度变化, 其中 20 km 高度处为 376.0~801.3 mPa, 27 km 处为 90.9~637.5 mPa, 35 km 处为 27.3~460.0 mPa, 41 km 处为 10.4~239.3 mPa. 安第斯山山地波动量通量随高度逐渐减小, 说明山地波在传播过程中有显著耗散, 将动量存储在背景大气中, 继而影响背景风场. 动量通量在 6−8 月变化较大, 多年平均峰值出现在 7 月, 相应的水平波长和垂直波长都相对更大. 5 月、9 月及 10 月的水平波长、垂直波长及动量通量均有所下降, 三个参数表现出相似的季节变化特征.

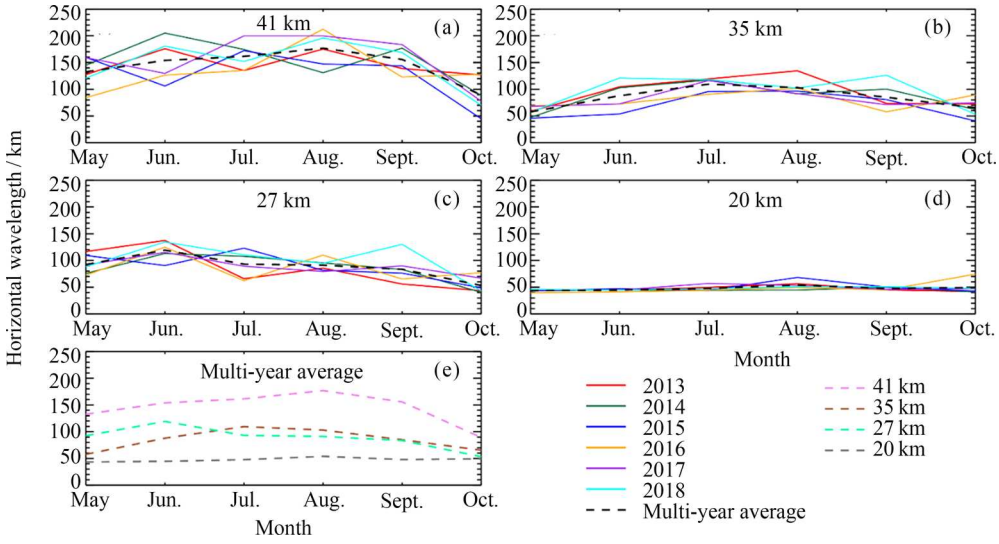

图 4　2013—2018 年 5—10 月安第斯山 41 km, 35 km, 27 km, 20 km 高度山地波月平均水平波长变化和水平波长年平均值的高度变化

Fig. 4　Multi-annual monthly-mean (May to October, 2013—2018) horizontal wavelength of mountain wave at 41 km, 35 km, 27 km, 20 km over Andes. The height variation of the multi-year average of the horizontal wavelength

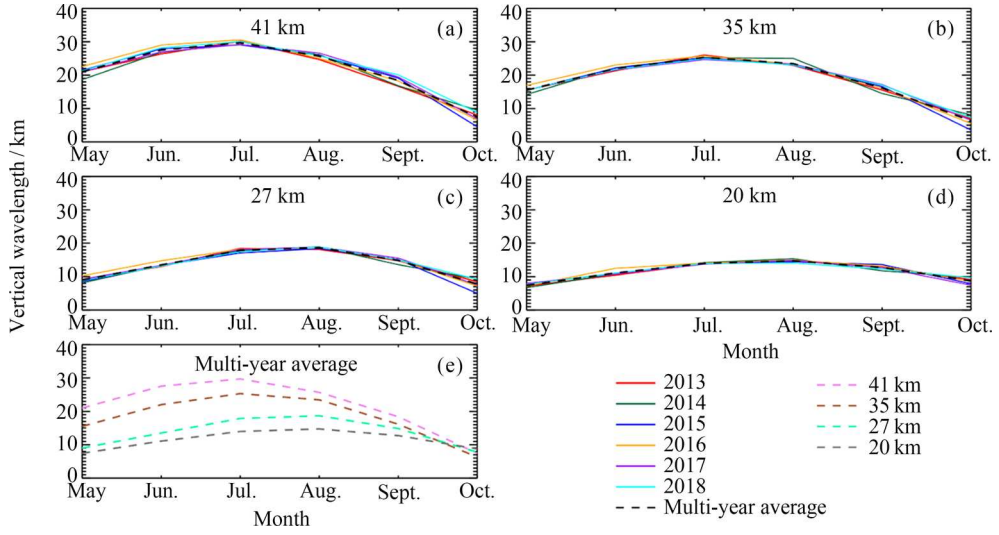

图 5　2013—2018 年 5—10 月安第斯山 41 km, 35 km, 27 km, 20 km 高度山地波月平均垂直波长变化和垂直波长年平均值的高度变化

Fig. 5　Multi-annual monthly-mean (May to October, 2013—2018) vertical wavelength of mountain wave at 41 km, 35 km, 27 km, 20 km over Andes and the height variation of the multi-year average of the vertical wavelength

4　结论

利用 AIRS 红外探测仪 4 个 15 μm 通道辐射测量数据在 2013—2018 年的结果, 结合 HWM14 背景风数据和 MSISE-00 模式的温度数据, 对安第斯山 (73°W, 51°S) 上空 20 km, 27 km, 35 km 及 41 km 高度的山地波进行了研究和统计分析.

对 2016 年 7 月 22 日安第斯山南侧上空观测到

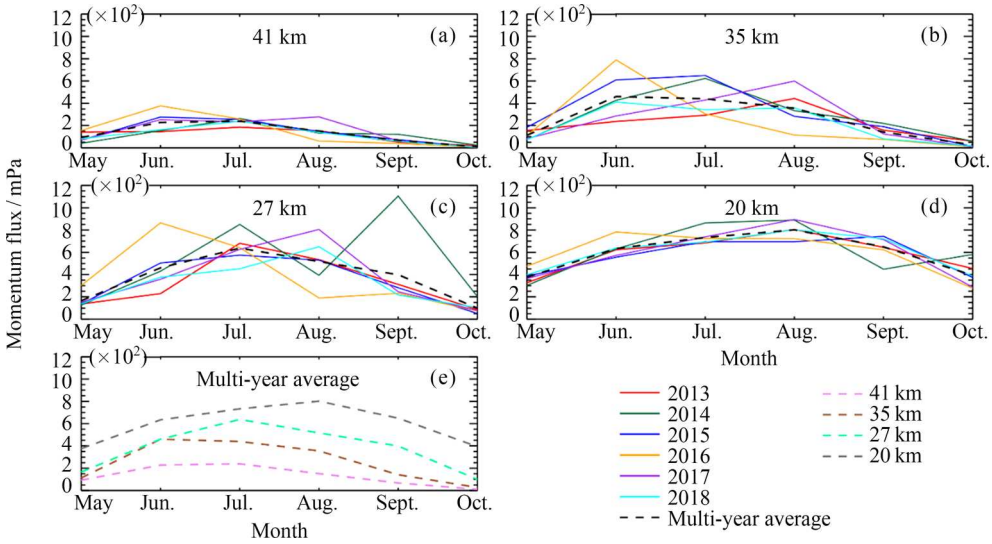

图 6 2013—2018 年 5—10 月安第斯山 41 km, 35 km, 27 km, 20 km 高度山地波月平均动量通量变化和动量通量年平均值的高度变化

Fig. 6 Multi-annual monthly-mean (May to October, 2013—2018) momentum flux of mountain wave at 41 km, 35 km, 27 km, 20 km height over Andes and the height variation of the multi-year average of the momentum flux

的一次重力波事件进行了详细的个例分析. 分析结果说明不同高度观测到的重力波参数是同一个波动, 这说明地形激发的重力波可以从近地面一直上传至低中间层, 继而对中间层大气产生重要影响. 该山地波在向上传播过程中, 水平波长随高度缓慢增加, 但是逆风传播的情况下, 受背景风场影响垂直波长随高度显著增大. 动量通量随高度显著下降, 表明山地波在向上传播过程中伴随着强烈耗散, 由此对背景大气产生显著影响.

对 2013—2018 年 AIRS 红外探测仪辐射测量的统计分析表明, 安第斯山上空的山地波主要发生在 5—10 月. 分析得到山地波的月平均水平波长、垂直波长及动量通量均没有明显的年际变化. 平均水平波长为 50~170 km, 其中 6—9 月较高, 5 月和 10 月有所下降. 安第斯山山地波垂直波长与动量通量具有相似的季节变化, 总体上看, 5—7 月增大, 8—10 月减小, 一般在 7 月达到峰值, 在 20 km, 27 km, 35 km 和 41 km 高度处, 垂直波长峰值分别为 14.7 km, 17.9 km, 25.3 km 和 29.7 km, 动量通量峰值分别为 801.3 mPa, 637.5 mPa, 440.0 mPa, 239.4 mPa.

月平均水平波长随着高度的升高而缓慢增加, 在 20 km 高度处为 43.5~53.9 km, 27 km 处为 53.3~119.2 km, 35 km 处为 57.6~109.5 km, 41 km 处为 89.3~176.8 km. 受背景风场的影响, 月平均垂直波长随高度显著增加, 在 20 km 高度处为 7.4~14.7 km, 27 km 处为 7.8~18.7 km, 35 km 处为 6.3~25.3 km, 41 km 处为 7.4~29.7 km. 动量通量随着高度上升显著下降, 20 km 高度处为 376.0~801.3 mPa, 27 km 处为 90.9~637.5 mPa, 35 km 处为 27.3~460.0 mPa, 41 km 处为 10.4~239.3 mPa, 说明安第斯山山地波向上传播过程中伴随着显著耗散, 耗散的动量将作用于背景大气, 对背景大气特别是高平流层至低中间层大气产生重要影响.

参考文献

[1] HOLTON J R. The role of gravity wave induced drag and diffusion on the momentum budget of the mesosphere [J]. *J. Atmos. Sci.*, 1982, **39**(4): 791-799

[2] HOLTON J R. The Influence of gravity wave breaking on the general circulation of the middle atmosphere [J]. *J. Atmos. Sci.*, 1983, **40**(10): 2497-2507

[3] CARIOLLE D, MULLER S, CAYLA F, *et al.* Mountain waves, polar stratospheric clouds, and the ozone depletion over Antarctica [J]. *J. Geophys. Res.*, 1989, **94**(D9). DOI: 10.1029/JD094ID09P11233

[4] PREUSSE P, DÖRNBRACK A, ECKERMANN S D, *et al.* Space-based measurements of stratospheric mountain

waves by CRISTA 1. Sensitivity, analysis method, and a case study [J]. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 2002, **107**(D23). DOI: 10.1029/2001JD000699

[5] ECKERMANN S D, MA J, WU D L, *et al.* A three-dimensional mountain wave imaged in satellite radiance throughout the stratosphere: evidence of the effects of directional wind shear [J]. *Quart. J. Royal Meteorol. Soc.*, 2007, **133**(629): 1959-1975

[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]. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 2008, **113**(D15). DOI: 10.1029/2007JD008807

[7] KUMAR K N, RAMKUMAR T K, KRISHNAIAH M. Analysis of large-amplitude stratospheric mountain wave event observed from the AIRS and MLS sounders over the western Himalayan region [J]. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 2012, **117**(D22): 22102

[8] GONG J, WU D L, ECKERMANN S D. Gravity wave variances and propagation derived from AIRS radiances [J]. *Atmos. Chem. Phys.*, 2012, **12**(4): 1701-1720

[9] ALEXANDER M J, TEITELBAUM H. Observation and analysis of a large amplitude mountain wave event over the Antarctic peninsula [J]. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 2007, **112**(21). DOI: 10.1029/2006JD008368

[10] HOFFMANN L, GRIMSDELL A W, ALEXANDER M J. Stratospheric gravity waves at Southern Hemisphere orographic hotspots: 2003—2014 AIRS/Aqua observations [J]. *Atmos. Chem. Phys.*, 2016, **16**(14): 9381-9397

[11] ESPINOZA J C, GARREAUD R, POVEDA G, *et al.* Hydroclimate of the andes part I: main climatic features [J]. *Front. Earth Sci.*, 2020, **8**(64). DOI: 10.3389/FEART.2020.00064

[12] AUMANN H H, CHAHINE M T, GAUTIER C, *et al.* AIRS/AMSU/HSB on the Aqua mission: design, science objective, data products, and processing systems [J]. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 2003, **41**(2): 253-264

[13] ALEXANDER M J, BARNET C. Using satellite observations to constrain parameterizations of gravity wave effects for global models [J]. *J. Atmos. Sci.*, 2007, **64**(5): 1652-1665

[14] HOFFMANN L, ALEXANDER M J. Occurrence frequency of convective gravity waves during the North American thunderstorm season [J]. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 2010, **115**(D20111). DOI: 10.1029/2010JD014401

[15] HOFFMANN L, XUE X, ALEXANDER M J. A global view of stratospheric gravity wave hotspots located with Atmospheric Infrared Sounder observations [J]. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 2013, **118**(2): 416-434

[16] STROW L L, HANNON S E, MACHADO D, *et al.* Validation of the Atmospheric Infrared Sounder radiative transfer algorithm [J]. *J. Geophys. Res.*, 2006, **111**(D9). DOI: 10.1029/2005JD006146

[17] HOFFMANN L. ALEXANDER M J. Retrieval of stratospheric temperatures from Atmospheric Infrared Sounder radiance measurements for gravity wave studies [J]. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 2009, **114**(D07105). DOI: 10.1029/2008JD011241

[18] ECKERMANN S D. Global measurements of stratospheric mountain waves from space [J]. *Science*, 1999, **286**(5444): 1534-1537

[19] SATO K, TSUCHIYA C, ALEXANDER M J, *et al.* Climatology and ENSO-related interannual variability of gravity waves in the Southern Hemisphere subtropical stratosphere revealed by high-resolution AIRS observations [J]. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 2016, **121**(13): 7622-7640

[20] FRITTS D C, ALEXANDER M J. Gravity wave dynamics and effects in the middle atmosphere [J]. *Rev. Geophys.*, 2003, **41**(1). DOI: 10.1029/2001RG000106

[21] 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]. *Geophys. Res. Lett.*, 2009, **36**(12): L12816

[22] DROB D P, EMMERT J T, MERIWETHER J W, *et al.* An update to the Horizontal Wind Model (HWM): the quiet time thermosphere [J]. *Earth Space Sci.*, 2015, **2**(7): 301-319

[23] PICONE J M, HEDIN A E, DROB D P, *et al.* NRLMSISE-00 empirical model of the atmosphere: statistical comparisons and scientific issues [J]. *J. Geophys. Res. Space Phys.*, 2002, **107**(A12). DOI: 10.1029/2002JA009430

[24] ERN M, PREUSSE P, ALEXANDER M J, *et al.* Absolute values of gravity wave momentum flux derived from satellite data [J]. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 2004, **109**(D20103). DOI: 10.1029/2004JD004752

[25] ALEXANDER M J, TEITELBAUM H. Three-dimensional properties of Andes mountain waves observed by satellite: a case study [J]. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 2011, **116** (D23). DOI: 10.1029/2011JD016151

[26] WRIGHT C J, HINDLEY N P, HOFFMANN L, *et al.* Exploring gravity wave characteristics in 3-D using a novel S-transform technique: AIRS/Aqua measurements over the Southern Andes and Drake Passage [J]. *Atmos. Chem. Phys.*, 2017, **17**(13): 8553-8575