0254-6124/2011/31(3)-311–07 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

Li Wei, Yi Fan. Research on correlation between gravity waves energy and jet. *Chin. J. Space Sci.*, 2011, **31**(3): 311-317

急流与低层大气重力波能量的相关性研究 *

李 伟[1,2] 易 帆[2]

1(河南工业大学信息科学与工程学院 郑州 450001)

2(武汉大学电子信息学院 武汉 430072)

摘 要 通过分析武汉 (30.5°N, 114°E) 上空 2000 至 2004 年的 Radiosonde 常规观测数据, 对当地对流层 (1∼ 10 km) 与低平流层 (18∼25 km) 的某些惯性重力波特征进行了研究, 发现重力波能量与急流强度变化之间存在显著的相关. 同时分析了海口 (20°N, 114°E) (2000 至 2004 年)、北京 (40°N, 116°E) (2001 年 12 月至 2003 年 2 月) 的 Radiosonde 观测数据并进行了比较, 发现较高纬度地区的相关性明显大于低纬度地区. 通过对武汉地区 2006 年 1 月 5 天 Radiosonde 加密观测数据的分析, 讨论了重力波动能与势能的高度变化, 进一步发现纬向风的垂直剪切与急流中心的分布分别与重力波势能和动能的强弱分布相对应.

关键词 Radiosonde 数据, 重力波, 急流

中图法分类号 P 353

par

Research on Correlation Between Gravity Waves Energy and Jet

LI Wei[1,2] YI Fan[2]

1(*School of Information Science and Engineering, Henan University of Technology, Zhengzhou* 450001)

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

Abstract By analyzing the routine Radiosonde data obtained at Wuhan (30.5°N, 114°E) from 2000 to 2004, some characteristics of inertial gravity wave in Troposphere and Lower Stratosphere (TLS) were studied, and a strong correlation between the variation of gravity wave energy and jet intensity was found. Similar result of Wuhan was obtained by analyzing the routine Radiosonde data obtained at Haikou (20°N, 114°E) and Beijing (40°N, 116°E), and stronger correlation was found in higher latitude area. An intensive Radiosonde observation at Wuhan, which lasted 5 days in Jan 2006, was conducted to examine the variation with altitude of gravity wave kinetic energy and potential energy, and it was demonstrated that the excitation of gravity wave in TLS is attributed to jet (zonal wind shear), which suggests that it's a main excitation source of gravity wave in lower atmosphere.

Key words Radiosonde data, Gravity wave, Jet

∗ 国家自然科学基金项目 (40731055) 和河南工业大学科技基金 (150285) 共同资助

2009-12-23 收到原稿, 2010-12-20 收到修定稿

E-mail: armadalee@hotmail.com

1 引言

重力波在大气环流与热结构中的重要作用在近年的观测与理论研究中得到了越来越多的重视, 重力波的激发与传播机制的研究日益成为热点问题 [1−3]. 目前可以通过覆盖不同高度范围的多种途径 (如机载探测、无线电探空仪、MST 雷达、火箭探测、Rayleigh 激光雷达等) 来进行重力波探测, 得到重力波的信息 [4]. 研究表明中纬度地区的重力波主要由急流、对流、地形所激发 [5−7], 其中 MST 雷达的观测结果表明, 中纬地区重力波的能量与急流活动密切相关 [7−8].

在众多大气观测手段中, Radiosonde 以其陆地涵盖地区广、数据完备等优点成为对流层与低平流层重力波研究的重要手段. Tsuda 等 [9−10] 利用高分辨率 Radiosonde 对 Kelvin 波和惯性重力波进行了研究. Allen 和 Vincent[11] 于 1995 年率先采用全球 18 个站点的 Radiosonde 数据对低层大气重力波活动的时间和空间变化进行了研究, 通过对重力波参数的研究希望得到波源信息. Vincent 和 Alexander[12] 于 2000 年对赤道地区低平流层重力波的季节变化与年变化进行了统计分析, 详细讨论了重力波参数的特性. 2005 年 Zhang 和 Yi[13] 通过对背景动能和重力波动能的相关分析, 进一步指出急流导致的动力学不稳定性是对流层与低平流层重力波主要的激发源. 吕洪方和易帆 [14] 通过对武汉上空瑞利激光雷达和 Radiosonde 观测结果进行比较, 发现武汉上空 30∼65 km 高度范围内的重力波能量与低层大气重力波的月平均振幅有较强的相关性, 同时发现急流与风剪切的年变化规律基本一致, 并与瑞利激光雷达得到的重力波年变化趋势一致. 2004 年 Tsuda 等 [15] 利用南半球 10°S–15°S 间具有较高时间分辨率的 Radiosonde 观测数据 (时间间隔 3 h), 讨论了时间平均的重力波能量随高度的变化, 进而讨论了重力波能量与急流垂直剪切之间的关系, 从而进一步阐明了急流在重力波激发中的作用.

统计研究表明, 急流对低层乃至中层大气重力波的激发会产生重要作用, 但是由于 Radiosonde 常规观测数据时间间隔较长 (一般 12 h), 所以对于重力波能量的分析一般采用对高度进行平均的结果. 采用 Radiosonde 加密观测数据 (如 2004 年 Tsuda 等的观测结果 [15]), 对重力波能量分析就可以采用对时间进行平均的结果, 但是数据分布的广度和持续时间都十分有限. 这里采用位于北半球中低纬度武汉上空的 Radiosonde 常规观测数据与加密观测数据, 分析了武汉地区对流层与低平流层重力波参数的统计特性, 讨论了高度平均的重力波能量随时间的变化和时间平均的重力波能量随高度的变化, 并探讨了波能量的变化与急流的关系, 同时将海口和北京的观测结果与武汉的进行了比较.

2 数据描述

采用的常规观测数据为武汉 (30.5°N, 114°E)、海口 (20°N, 114°E)、北京 (40°N, 116°E) 当地气象部门提供的 Radiosonde 观测数据. 其中武汉与海口为 2000 至 2004 年的数据, 北京为 2001 年 12 月至 2003 年 2 月共 15 个月的数据. 以上数据来自每天的两次观测, 分别在 08:00 LT 和 20:00 LT 进行, 原始电码取样间隔为 7∼9 s. 由于气球的上升并非匀速运动, 所以取样点的空间分布不均匀 (30∼200 m). 为处理数据方便, 对北京、武汉和海口原始数据进行了间隔 100 m 的线性插值. 数据所能取到的最大高度取决于气球所能达到的高度. 根据统计, 探空气球达到 25 km 和 27 km 高度的探测记录分别占总数的 56% 和 26%, 因此取 25 km 为提取准单色重力波的上限.

2006 年 1 月 11 至 16 日在武汉进行了 Radiosonde 的加密观测, 每日凌晨 05:00 LT–23:00 LT 每 3 h 释放一次探空仪, 共得到了 35 个剖面结果. 对加密观测数据进行了与常规观测数据相同的间隔为 100 m 的线性插值. 常规观测与加密观测数据内容均包括温度、湿度、气压及纬向风速与经向风速.

3 结果分析

3.1 常规观测结果分析

根据文献 [13] 提出的一种提取准单色重力波方法, 将单个探空廓线分解为背景和扰动两部分, 采用最小二乘法用二次多项式对纬向风、经向风和温度三个分量进行拟合, 原始数据与背景之差则视为由惯性重力波引起的扰动. 通过对扰动分量 $[u', v', T']$ 用下式进行谐波拟合, 以提取准单色重力波的各分量, 即

$$U = A\sin\left(\frac{2\pi}{\lambda_z}z + \varphi\right). \tag{1}$$

其中, $U = [u_f, v_f, T_f]$ 为扰动分量; $A = [A_u, A_v, A_T]$ 和 $\varphi = [\varphi_u, \varphi_v, \varphi_T]$ 分别为拟合得的准单色分量的振幅和相位; λ_z 为垂直波长, 通过最大熵谱法对数据进行谱分析, 取振幅最大的主峰所对应的波长为 λ_z. 考虑到各分量的主波长有差异, 将各主波长的均值视为所提取的准单色重力波的波长, 仅当 $[u, v, T]$ 三个分量的主波长均值相对标准差小于 20% 时, 才认为提取到一个准单色重力波. 利用此垂直波长对各分量再次进行谐波拟合, 即可得到各分量的振幅和相位. 可以根据如下公式来估算重力波的动能与势能:

$$E_K = \frac{1}{2}(\overline{u'^2} + \overline{v'^2}), \tag{2}$$

$$E_P = \frac{1}{2}\frac{\overline{g^2T'^2}}{N^2T_0^2}. \tag{3}$$

垂直本征相速度可以由本征频率 Ω 与垂直波长直接计算得到, 其方向依据如下规则判定: 在北半球, 纬向风与经向风的矢端曲线逆时针旋转代表能量下传, 顺时针旋转代表能量上传. 图 1 给出的是武汉地区垂直本征相速度的分布. 对流层中上传与下传重力波的比例大致相等, 上传重力波占到了 46.8%. 但是低平流层中明显上传重力波占优势, 尤其在 $-0.2\sim0\,\mathrm{m/s}$ 之间的分布接近 60%, 使得整个上传重力波占到了总数的 73.1%. 对海口和北京地区

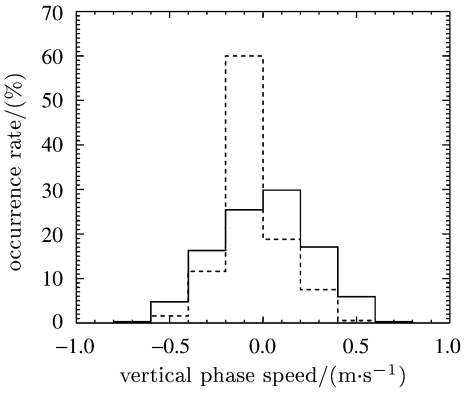


图 1　武汉地区垂直本征相速度的分布 (实线为对流层结果, 虚线为低平流层结果)

Fig. 1　Histogram of vertical intrinsic phase velocities in Wuhan (solid and dotted lines denote the occurrence rate of gravity waves in the troposphere and lower stratosphere, respectively)

垂直重力波本征相速度的分布及上、下传比例进行类似讨论, 具体参数列于表 1. 从表 1 可以看到, 在武汉、海口与北京地区对流层内上传重力波所占比例非常接近, 均在 45%~47% 左右; 而低平流层上传重力波均占绝对优势, 但是随着纬度升高, 三个站点的上传重力波比例也有所上升. 这表明重力波波源在 18 km 以下的区域, 且随纬度升高该波源的作用在加强.

图 2 给出了三地急流强度与高度的月平均值随时间变化的规律. 急流的强度与高度都呈现出明显的季节变化: 急流强度的极大值与极小值分别出现在冬季与夏季, 相应地, 急流高度具有同样的变化趋势, 但是北京地区的急流高度变化与以上描述并不完全

表 1　重力波传播方向统计

Table 1　Statistical results of gravity waves propagation

站点		海口	武汉	北京
FUP*/(%)	对流层	45.6	46.8	46.5
	平流层	67.0	73.1	76.3

*Fraction of Upward Propagation

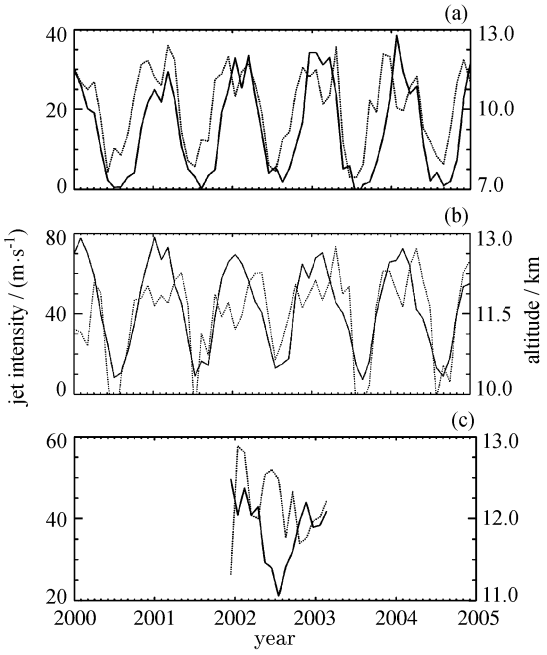


图 2　海口 (a)、武汉 (b) 和北京 (c) 急流强度 (实线) 与高度 (点线) 的月平均值随时间变化的曲线

Fig. 2　Monthly-averaged intensity (solid) and altitude (dotted) of jet stream of Haikou (a), Wuhan (b) and Beijing (c)

一致, 呈现出不规则的变化趋势. 值得注意的是, 武汉地区的急流强度较其他两地要大很多, 其极大值接近 80 m/s, 海口与北京分别只有 50 m/s 和 30 m/s. 对于北纬 30° 附近强烈急流的出现, Shepherd[16] 给出了解释. 强烈的急流提供了较强的纬向风剪切, 从而导致大气动力学不稳定性甚至湍流, 对低层大气波的

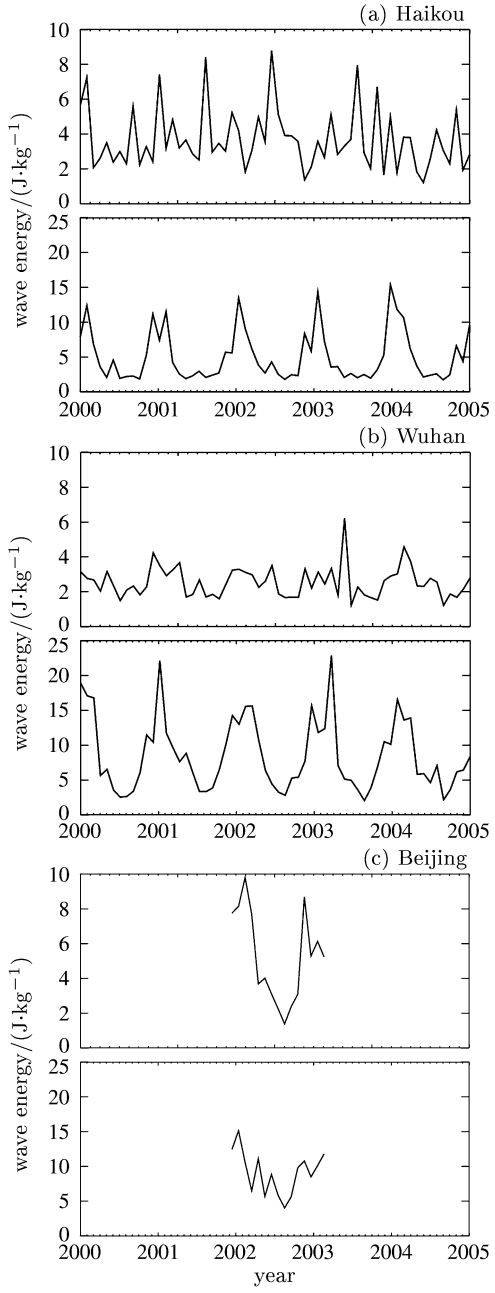


图 3 对流层 (下) 与低平流层 (上) 重力波能量月平均值的时间变化

Fig. 3 Monthly-averaged energies of gravity waves in the troposphere (bottom) and lower stratosphere (top)

激发产生了重要影响. 图 3 给出了对流层与低平流层重力波能量月平均值的时间变化, 从中可以看到波能量均呈现出明显的年变化和季节变化, 能量极大值出现在冬季, 极小值出现在夏季, 低平流层波能量较对流层要弱得多, 其变化相对来讲也不是很规则. 与图 2 比较可以看到, 三地急流强度的月平均值变化趋势与对流层内重力波能量的月平均值变化趋势是一致的, 显示出了同样的变化规律.

为了进一步讨论急流与重力波能量之间的关系, 表 2 给出了急流强度与重力波能量月平均变化的相关系数. 三地对流层均表现出了强烈的相关, 武汉和北京地区平流层也表现出了较强的相关. 值得注意的是, 对流层内相关系数非常接近, 平流层内北京地区的相关系数明显大于武汉地区, 这与重力波上传比例的分布规律是非常类似的. 海口地区平流层重力波能量与急流强度的相关度系数很小, 这可能是由热带地区不同的重力波激发机制造成的. 可以注意到, 武汉地区的背景风场与急流强度比海口和北京要大得多, 相应的武汉地区对流层波能量比较大. 对流层与低平流层波能量表现出相似的季节变化规律, 说明它们可能具有相同的波源. 在全球不同纬度地区的许多站点都观测到重力波能量类似的年季变化 [11,18−22]. Zink 和 Wilson 等 [21,24] 认为这种变化是由背景大气导致的, 背景风的强度与波的活动存在相关 [20,23].

3.2 加密观测结果分析

对武汉 35 个剖面在各个高度上进行时间上的插值, 以得到每天凌晨 02:00 LT 的剖面, 使最终得到的波能量随时间均匀分布, 从而显示完整的波结构. 对所有 40 个剖面得到的温度、纬向风、经向风数据在各个高度上进行算术平均, 得到背景温度与背景风速; 用每次的观测数据减去背景值, 即得到温度扰动量与风速扰动量. 由张绍东和易帆的研究 [13] 得知, 武汉上空重力波垂直波长多在 2~6 km 内, 故对每次

表 2 急流强度与重力波能量月平均分布的相关系数

Table 2 Correlation coefficients of monthly-averaged jet intensity and gravity wave energies

站点	海口	武汉	北京
对流层	0.71	0.83	0.72
平流层	−0.10	0.53	0.78

观测的扰动量进行截止波长为 2~6 km 的带通滤波.

根据得到的重力波风速扰动量即可获得风速扰动量平方随时间与高度变化的等值线 (见图 4). 将风速与温度的扰动量代入式 (2) 和式 (3) 计算重力波动能和势能, 与以往不同的是, 在计算时对时间进行平均, 就可以得到动能与势能随高度分布的剖面 (见图 5)[15]. 武汉地区惯性频率对应的惯性周期约为 24 h. 由于这里对 40 个剖面进行了时间平均 (对应约 120 h, 远大于惯性周期), 因此平均后的结果可以用来描述各个高度上的波能量.

按照上述方法, 得到武汉地区 2006 年 1 月 11 至 16 日各个高度上重力波风速扰动平方的计算结果, 它表征了重力波动能的变化. 图 4 给出了该观测期内动能随高度与时间变化的等值线, 从中可以看到动能与急流时间上的相关性. 图 4 中的星号表示急流高度, 从图 4 中可以清晰地看到, 在急流附近, 上下临近区域均对称地出现了重力波动能的峰值, 并呈现出周期性变化, 周期在 12~24 h 之间. 11 至 14 日急流高度稳定分布在 11~13 km, 重力波动能的峰值出现在急流上下 3 km 区域内, 波能量为 3~20 J·kg^{-1}; 但是在 15 日, 急流高度出现了一次突然的提升, 位于 13~14 km, 相应的重力波动能峰值所在高度也出现了提升. 以上结果显示, 重力波的产生可能与急流存在密切的联系. 在急流高度附近 3 km 以外的区域, 也有重力波的峰值出现, 但是波能量较 3 km 区域内的波能量小, 相对急流的分布也不是很对称. 这可能是重力波在上传或下传后耗散的结果.

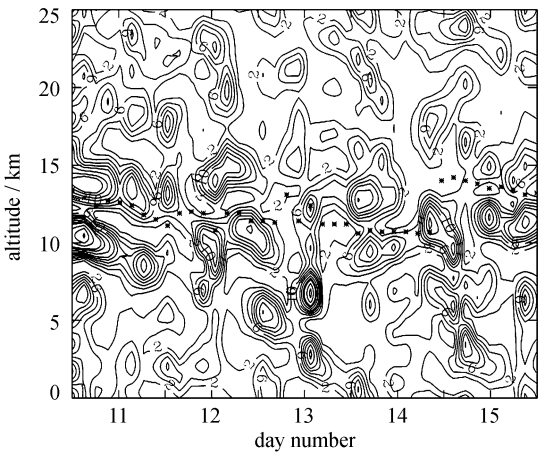


图 4　武汉地区 2006 年 1 月 11 至 16 日重力波扰动量平方等值线 (星号代表急流高度)

Fig. 4　Contour plot of wind variance during 11–15 January 2006 in Wuhan (asterisks denote the altitude of jet stream)

为了更清晰地看到急流、剪切与重力波能量高度上的相关性, 图 5 给出了武汉地区时间平均的重力波动能和势能与纬向风剪切平均值之间随高度变化的对应关系. 从图 5 可以看出, 急流中心位于 12 km 处, 其对应的剪切值为极小值, 急流中心附近 8~10 km 和 13~18 km 出现了剪切的峰值, 其中低平流层的剪切峰值呈现双峰结构. 相应地, 重力波的动能与势能在此区域附近都出现了峰值. 动能在 8~16 km 之间出现了高于其他高度范围的波峰, 这表明在急流附近重力波普遍存在, 但是在急流中心处动能出现了一个低谷, 对应着剪切的极小值, 低平流层的动能略小于对流层的动能, 低平流层的势能峰值出现的区域与剪切峰值的高度相同, 但是对流层的势能峰值则出现在剪切峰值下方 1 km 处.

总体来说, 重力波能量与急流剪切之间存在明显的对应关系, 这说明急流的剪切不稳定性是重力波主要的激发源. 类似的结果在 Tsuda 等 [15] 的 Radiosonde 观测当中也有讨论. Alexander[25] 对这一结果进行了模拟计算, 建立了一个由对流引起的重力波模型, 他们在研究当中将波能量的峰值归于背景风剪切与大气密度降低的共同作用. Steven 和 Mohan 等研究了急流区附近强烈的对流和湍流活动, 强急流附近风剪切非常不稳定, 这种强烈的风剪切不稳定被普遍认为是激发产生重力波的原因之一 [26−27].

4　结论

通过对武汉地区 2000 至 2004 年 Radiosonde 常规观测数据以及武汉地区 2006 年 1 月 11 至 15 日 Radiosonde 加密观测数据的分析, 研究了当地重力波的某些统计特性以及重力波与急流的关系, 同时与海口及北京地区的重力波统计结果进行比较, 得出如下结论.

(1) 重力波在对流层上传波与下传波所占比例大致相等, 低平流层上传波所占比例远大于下传波, 达到 70% 左右. 这说明低平流层重力波的波源在对流层. 对流层与低平流层波能量表现出相似的季节变化规律, 这说明其可能具有相同的波源. 平流层内重力波上传比例随纬度的升高有所增加.

(2) 重力波能量与急流强度的年变化显示出高度

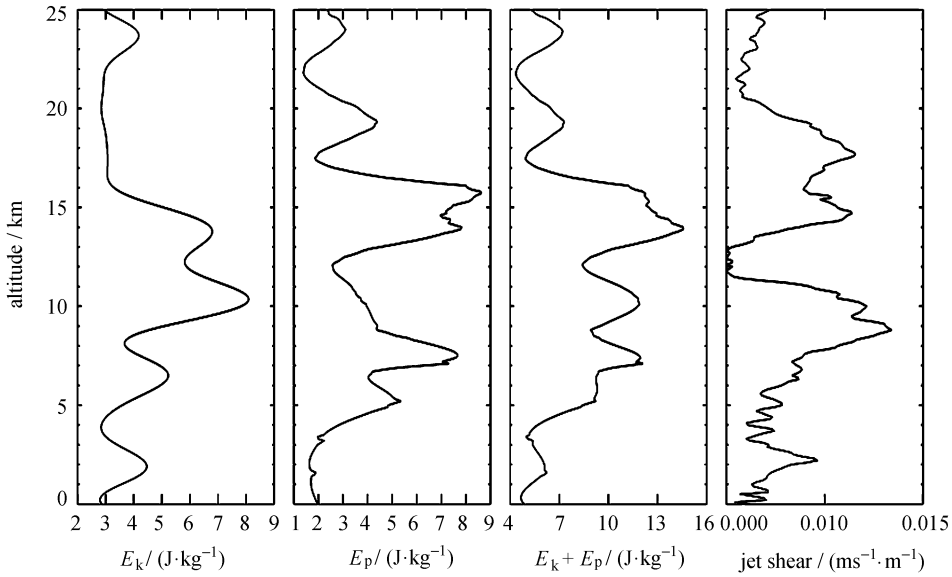


图 5 武汉地区重力波平均能量与纬向风剪切平均值高度廓线

Fig. 5 Averaged gravity wave energy and zonal wind shear distributed with height

的相关性, 武汉地区重力波能量明显高于北京与海口地区, 这与武汉地区较大的急流强度相符合; 同时, 较高纬度地区重力波能量与急流强度的相关性也大于低纬度地区.

(3) 加密观测数据的处理结果显示, 急流中心附近对称地出现了重力波动能的峰值, 且急流剪切的峰值与重力波动能、势能的峰值在高度上互相吻合, 急流中心高度对应着重力波能量的相对减弱, 这进一步表明急流与重力波存在显著的相关, 这种强烈的背景风剪切是重力波激发的原因之一.

参考文献

[1] Lindzen R S. Turbulence and stress owing to gravity wave and tidal breakdown [J]. *J. Geophys. Res.*, 1981, **86**:9707-9714

[2] Holton J R. The role of gravity wave-induced drag and diffusion in the momentum budget of the mesosphere [J]. *J. Atmos. Sci.*, 1982, **39**:791-799

[3] Tsuda T, Murayama Y, Yamamoto M, Kato S, Fukao S. Seasonal variation of momentum flux in the mesosphere observed with the MU radar [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 1990, **17**:725-728

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

[5] Nastrom G D, Fritts D C. Source of mesoscale variability of gravity waves: I Topographic excitation [J]. *J. Atmos. Sci.*, 1992, **49**:101-110

[6] Fritts D C, Nastrom G D. Source of mesoscal variability of gravity waves: II Frontal, convective, and jet stream excitation [J]. *J. Atmos. Sci.*, 1992, **49**:111-127

[7] Tsuda T, Murayama Y, Nakamura T, Vincent R A, Manson A H, Mee k C E, Wilson R L. Variations of the gravity wave characteristics with height, season and latitude revealed by comparative observations [J]. *J. Atmos. Terr. Phys.*, 1994, **54**:1043-1049

[8] Sato K. Vertical wind disturbances in the troposphere and lower stratosphere observed by the MU radar [J]. *J. Atmos. Sci.*, 1990, **47**:2803-2817

[9] Tsuda T, Murayama Y, Wiryosumarto H, Harijono S W B, Kato S. Radiosonde observations of equatorial atmosphere dynamics over Indonesia: 1 Equatorial waves and diurnal tides [J]. *J. Geophys. Res.*, 1994, **99**:10 491-10 505

[10] Tsuda T, Murayama Y, Wiryosumarto H, Harijono S W B, Kato S. Radiosonde observations of equatorial atmosphere dynamics over Indonesia: 2 Characteristics of gravity waves [J]. *J. Geophys. Res.*, 1994, **99**:10 507-10 516

[11] Allen S J, Vincent R A. Gravity wave activity in the lower atmosphere: Seasonal and latitudinal variations [J]. *J. Geophys. Res.*, 1995, **100**:1327-1350

[12] Vincent R A, Alexander M J. Gravity waves in the tropical lower stratosphere: An observational study of seasonal and interannual variability [J]. *J. Geophys. Res.*, 2000, **105**:17 971-17 982

[13] Zhang S D, Yi F. A statistical study of gravity waves from radiosonde observations at Wuhan (30°N, 114.4°E)

China [J]. *Ann. Geophys.*, 2005, **23**:665-673

[14] Lü Hongfang, Yi Fan. Gravity wave characteristics observed by lidar and Radiosonde in Wuhan [J]. *Chin. J. Geophys.*, 2006, **49**(6):1582-1587. In Chinese (吕洪方, 易帆. 利用瑞利激光雷达和无线电探空仪观测数据对武汉上空重力波特性进行的研究 [J]. 地球物理学报, 2006, **49**(6):1582-1587)

[15] Tsuda T, Venkat Ratnam M, Peter T, May M, Alexander Joan, Vincent R A, Andrew MacKinnon. Characteristics of gravity waves with short vertical wavelengths observed with radiosonde and GPS occultation during DAWEX (Darwin Area Wave Experiment) [J]. *J. Geophys. Res.*, 2004, **109**, D20S03

[16] Shepherd T G. Large-scale atmospheric dynamics for atmospheric chemists [J]. *Chem. Rev.*, 2003, **103**:4509-4531

[17] Tsuda T, Inoue T, Fritts D C, VanZandt T E, Kato S, Sato T, Fukao S. MST radar observations of a saturated gravity wave spectrum [J]. *J. Atmos. Sci.*, 1989, **46**:2440-2447

[18] Yoshiki M, Sato K. A statistical study of gravity waves in the polar regions based on operational radiosonde data [J]. *J. Geophys. Res.*, 2000, **105**:17 995-18 011

[20] Murayama Y, Tsuda T, Fukao S. Seasonal variation of gravity wave activity in the lower atmosphere observed with the MU radar [J]. *J. Geophys. Res.*, 1994, **99**:23 057-23 069

[21] Zink F, Vincent R A. Wavelet analysis of stratospheric gravity wave packets over Macquarie Island: 1 Wave parameters [J]. *J. Geophys. Res.*, 2001, **106**:10 275-10 288

[22] Kitamura Y, Hirota I. Small-scale disturbances in the lower stratosphere revealed by daily rawin sonde observations [J]. *J. Meteorol. Soc. Jpn.*, 1989, **67**:817-830

[23] Sato K. A statistical study of the structure, saturation and sources of inertia-gravity waves in the lower stratosphere observed with the MU radar [J]. *J. Meteorol. Soc. Jpn.*, 1994, **56**:755-774

[24] Wilson R, Chanin M L, Hauchecorne A. Gravity waves in the middle atmosphere observed by Rayleigh lider: 2 Climatology [J]. *J. Geophys. Res.*, 1991, **96**:5169-5183

[25] Alexander M J, May P T, Beres J. Gravity waves generated by convection in the Darwin area during the Darwin Area Wave Experiment. *J. Geophys. Res.*, 2004, **109**, D20S04

[26] Steven E Koch, Dorian Paul B, A mesoscale gravity wave event observed during CCOPE: Part III Wave environment and probable source mechanisms [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 1988, **116**(12):2570-2592

[27] Mohan K Ramamurthy, Robert M Rauber, *et al.* A Comparative study of large-amplitude gravity-wave events [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 1993, **121**(11):2951-2974