

A Case Study of Atmospheric Gravity Wave in Nanling Area

Mingxiao Gong

Ocean University of China, Qingdao
Email: huihuxidetong8816@126.com

Received: Aug. 5th, 2014; revised: Sep. 7th, 2014; accepted: Sep. 16th, 2014

Copyright © 2014 by author and Hans Publishers Inc.
This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

We get an obvious gravity wave case by analysing MODIS data. Then we use theory of shear instability and geostrophic unbalanced relationship to prove it. The result shows that wind shear and geostrophic adjustment all play an important role in the development of gravity wave. Wavelet analysis is used to study the characters of the gravity wave in depth. We find that the wavelength of the gravity wave is centered between 300 - 350 km, and the height is centered between 900 hPa and 500 hPa.

Keywords

Gravity Waves, Wavelet Analysis, Shear Instability, Geostrophic Unbalanced, MODIS

南岭地区大气重力波个例分析

官明晓

中国海洋大学, 青岛
Email: huihuxidetong8816@126.com

收稿日期: 2014年8月5日; 修回日期: 2014年9月7日; 录用日期: 2014年9月16日

摘要

本文主要通过MODIS资料分析得到明显重力波个例, 然后对其进行分析。运用切变不稳定和非地转平衡

关系来对此次重力波进行了验证。结果显示风切变和地转适应对此次重力波的生成有一定的触发作用。运用小波分析的方法对此次重力波进行了深入的分析,分析表明此次重力波的波长主要集中在300 - 350 km附近,高度集中在950 hPa和500 hPa附近。

关键词

重力波, 小波分析, 切变不稳定, 非地转平衡, MODIS

1. 引言

大气重力波是大气中的基本波动,是普遍存在的中小尺度扰动,在中层大气中起着重要作用。重力波产生在一个稳定层结的大气中,当气块在垂直方向上位置改变时,环境的回复力会不断的迫使其回到原来的平衡位置,因而产生震荡,并将能量向下游传送。它对于触发对流性风暴、传输能量和动量起到重要的作用[1],对天气系统的影响很大,因此对重力波发展规律和发展机制的研究具有十分重要的意义。

关于重力波的生成机制,国内外已经进行了很多研究。Gossard and Hook[2]论述了对流层低层重力波的生成机制时指出重力波会由于气流边界附近的阻碍机制而激发,这些激发机制通常包括地形、爬线和锋线系统、湍流及边界层扰动、对流、波相互作用、地转适应及切变不稳定等。Uccellini and Koch[3]提出了两个重力波波源机制,切变不稳定和地转调整过程,指出与急流伴随的垂直切变是重力波产生的能量源。

本文对 MODIS 卫星观测到的一个重力波个例进行分析和验证,分析此次重力波过程的发生发展机制,及对天气系统的影响。

2. 卫星观测

为得到重力波明显的个例,我们从 MODIS 逐日的卫星图像中筛选大气重力波。在 2013 年 2 月 18 日 13 时 30 分(UTC),在南岭附近地区发现一个明显的重力波。图 1 显示地面被云层覆盖,从局部截图中可以看到其形状类似重力波模型。下文中将验证其是否为重力波,并对其进行分析研究。

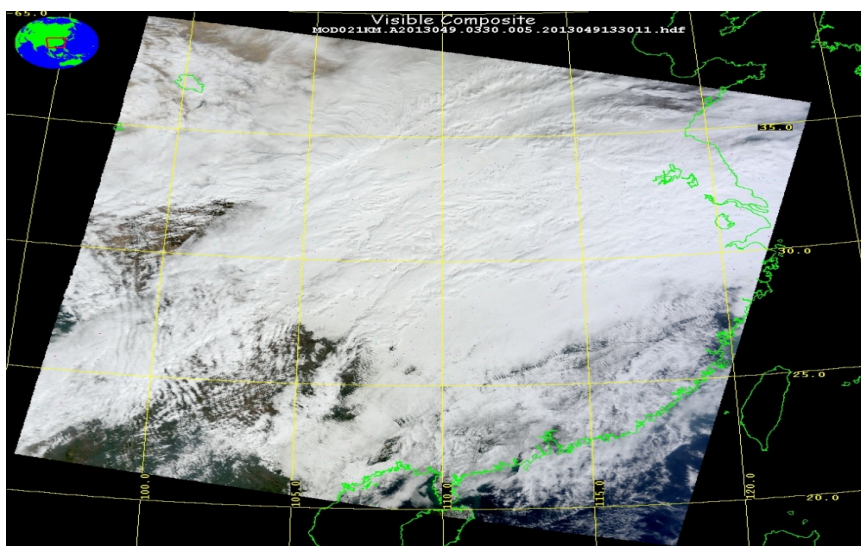


Figure 1. MODIS imagery at 13:30 (UTC) on 18 February 2013
图 1. 2013 年 2 月 18 日 13 时 30 分(UTC)的 MODIS 卫星图像

3. 重力波判定

对于大气重力波的判定可以通过 700 hPa、850 hPa 等压面的散度场辐合辐散交替分布来判定,也可以从散度剖面图中辐合辐散的交替出现或者位温剖面图上的等值线波动及垂直运动来判定[4]。下面我们通过散度场的空间和时间的变化来判断重力波的存在和传播。

在图 2 上,2013 年 2 月 18 日 06 时,出现一条辐合、辐散交替的带状区域,水平尺度约 12 km。到 12 时,辐合、辐散交替带依旧存在,且向东向北移动并发展,波动的范围增大,水平尺度达到 20 km,水平散度的量级为 10^{-5} s^{-1} 。这种辐合、辐散场的交替分布,表明有上升和下沉运动的发展,是重力波的一个重要特征[5]。

4. 中尺度重力波的激发机制

4.1. 切变不稳定机制

覃卫坚等[4]指出,惯性重力波强度和风速垂直切变成正比,随着风速垂直切变增大而增大。图 3 是

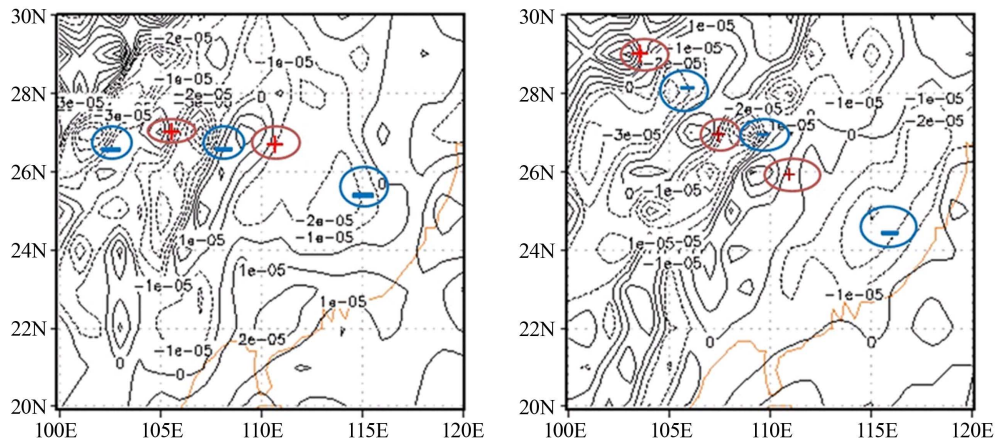


Figure 2. Divergence of 500 hPa at 06:00(a) and 12:00 on 18 February 2013 (UTC)

图 2. 2013 年 2 月 18 日 06 时(a)和 12 时 500 hPa 散度场(UTC)

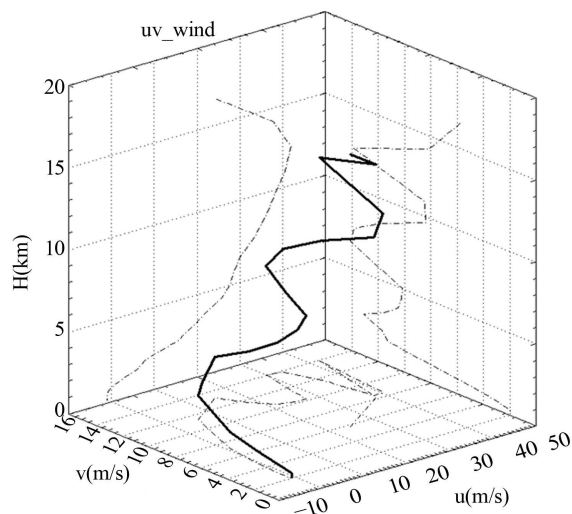


Figure 3. Vertical wind profile at 12:00 of 2013.02.18 (UTC)

图 3. 2013 年 2 月 18 日 12 时水平风垂直剖面图(UTC)

2013年2月18日12时(UTC)的三维水平风垂直剖面图,可以看出此时的垂直风切变明显。低层是偏东风,随高度增加西风慢慢增强,对重力波起到了激发和增强的作用。

理查森数(Ri):

$$Ri = \frac{N^2 D^2}{U^2} \quad (1)$$

由理查森数(Ri)定义式可以看出, Ri 与垂直风切有很好的对应关系,风切变越大的地方,理查森数越小。因此可以用 Ri 来衡量垂直风切变的大小,理查森数小于 0.25 的地区是波动发生的能量来源[6]。寿绍文[7]指出重力波形成在 $Ri < 0.25$ 的环境场中。

从2013年2月18日12时(UTC)的理查森数分布场(图4)来看,12时整个华南大片区域处于 $Ri < 0.25$ 的区域。说明此处区域存在较强的气流扰动,风场的垂直切变将基本气流的动能将转化为扰动动能(即波能),激发重力波的产生。

4.2. 非地转辐合辐散机制(非平衡流机制)

当大气的地转平衡状态破坏时,非地转运动产生的辐合辐散会激发重力惯性波。大气通过这种中尺度波动进行动量和能量的重新分配,使大气重新达到地转平衡。判断非平衡流的方法很多,但使用最普遍,效果最优的是拉格朗日罗斯贝数和非线性平衡方程[8] [9]。

4.2.1. 拉格朗日罗斯贝数(Ro)

诊断非平衡流用到拉格朗日罗斯贝数(Ro), Ro 表示惯性力与科氏力之比。

$$Ro = \frac{dV/dt}{fV} \quad (2)$$

由无摩擦运动方程得到

$$Ro = \frac{|dV/dt|}{fV} = \frac{|fV_{ag} \times k|}{f|V|} = \frac{V_{ag}}{|V|}, \quad (\text{Koch and Dorian 1988}) \quad (3)$$

但是(1)定义的 Ro 根据观测数据很难计算出来, Uccellini(1984)去掉局地项,只保留平流项,得到

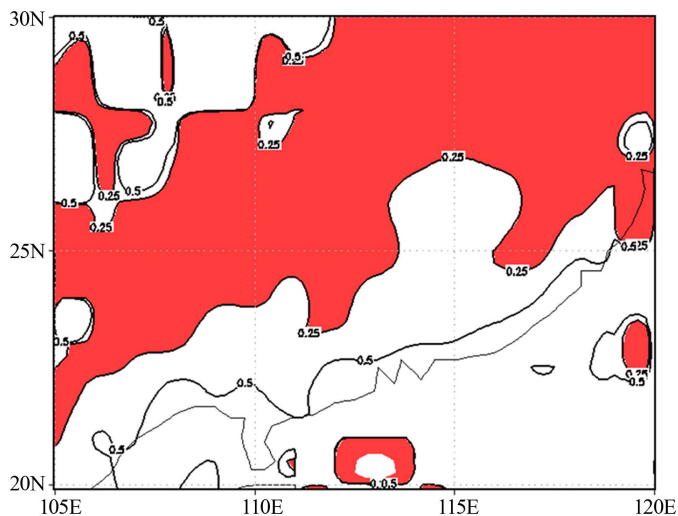


Figure 4. Ri profile of 850 hPa at 12:00 on 18 February 2013 (UTC)
图4. 2013年2月18日12时(UTC)850 hPa等压面 Ri 分布场

$$Ro \sim \frac{|V \cdot \nabla V|}{f|V|}$$

Koch and Dorian 提出一个更精确的算法: $Ro \approx \frac{|V_{ag}^\perp|}{V}$ 。用垂直于流的非地转风部分比实际测得的风速。

Zhang 等将拉格朗日罗斯贝数大于 0.7 和出现强气块散度倾向共同作为非平衡流的诊断标准[8] [9]。孙艳辉等[10]解释当 $Ro > 0.7$, 表示科氏力的大小与惯性力相当, 会出现风向垂直于基本气流的运动, 风向将出现明显的偏转, 产生显著的地转偏差, 同时会产生强烈的气流辐合辐散, 大气处于不平衡的状态。因此可以用 Ro 的大小作为判断大气非平衡的一个指标。

12 时 850 hPa(图 5)罗斯贝数大于 0.7, 且 $Ro \geq 0.7$ 的区域比 06 时明显增大, 说明大气不平衡状态增强, 出现了显著的非地转运动, 可以出现重力波。

4.2.2. 非线性平衡方程余项(ΔNBE)

非线性平衡方程(NBE):

$$\Delta NBE = 2J(u, v) + f\zeta - \nabla^2\Phi - \beta u \cong 2I_{xy}(\partial\Psi/\partial x, \partial\Psi/\partial y) + \nabla \cdot (f\Psi) - \nabla^2\Phi \quad (5)$$

其中, $\beta = \partial f / \partial y$, Φ 代表位势高度, Ψ 代表流函数, ζ 代表相对涡度。

Zhang[8] [9]指出根据尺度分析, ΔNBE 的量级应该小于方程右边三项中任何一项。如果 ΔNBE 的量级相当于或者大于这三项中的任何一个, 那么平衡方程就不成立, 即大气处于不平衡状态。因此可以将其作为判断大气不平衡的一个判据。

图 6 显示, ΔNBE 有明显的非零值($\sim 10^{-8}$)区域, 而且 ΔNBE 的高值区和 Ro 的高值区基本吻合, ΔNBE 的极值区出现在 $23^\circ N$, $104^\circ E$ 处, 极大值达到 $5 \times 10^{-8} s^{-2}$, 其余三项的极大值分别为 2×10^{-8} , 1×10^{-8} , 3×10^{-8} , 因此可以说明此时有强烈的非平衡流。而且的极大值区域正好处于卫星图像上发现的重力波的下游地区。这与 Zhang 等[8]波动形成的区域在的极值区下游的理论吻合。

5. 波动的特征分析

本研究采用 Morlet 小波对 2013 年 2 月 18 日 06 时和 12 时每一层的垂直速度做小波分析, 绘制出小波系数的分布场。小波系数越密集的地方代表波动能量越大。图 7 中可以看出从 06 时到 12 时, 波动在不断发展强大。300 hPa 波动一直较弱, 600 hPa~900 hPa 波动较强。到 12 时, 900 hPa 波动主要集中在波长为 300 km 波段, 而 600、700 hPa 波动集中在 350 km 波段。这两个波段(300 km, 350 km)的详细波信号垂直分布见图 8, 可见 300 km 波段遍及整个对流层, 因此将其作为此次地转调整过程的基本波动模式。300 km 波动在 700 hPa 及 800~900 等压层上各有一个相位差, 在 400~600 hPa 和 900~960 hPa 附近小波系

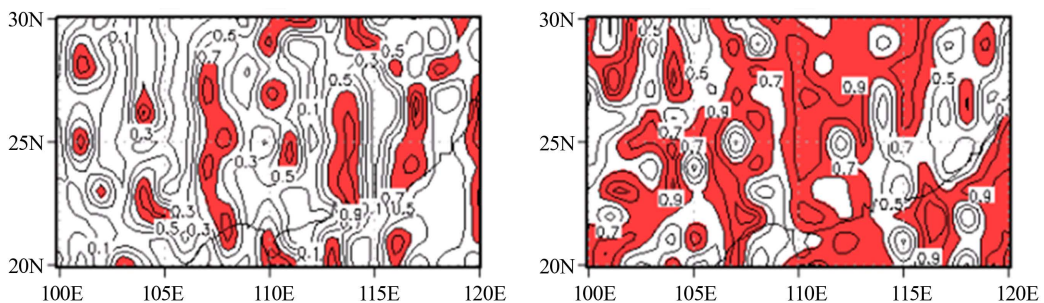


Figure 5. Ro profile of 850 hPa at 06:00 and 12:00 on 18 February 2013 (UTC) ($Ro \geq 0.7$, shaded)
图 5. 2013 年 2 月 18 日 06 时和 12 时(UTC) 850 hPa Ro 场 (阴影部分 $Ro \geq 0.7$)

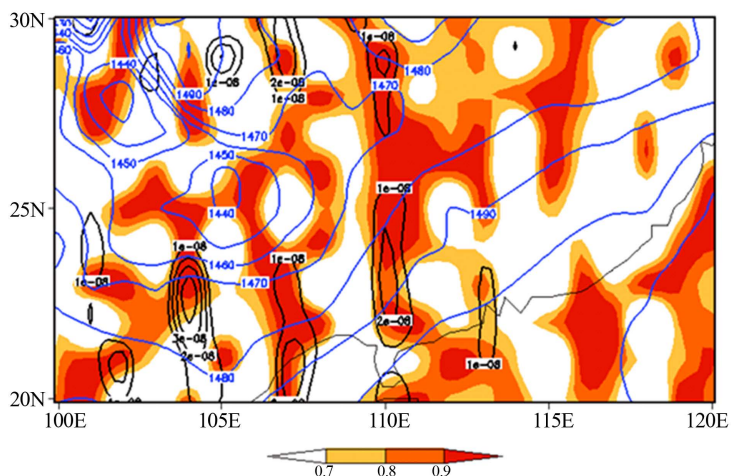


Figure 6. The blue line is the height of 850 hPa, ($Ro \geq 0.7$ shaded); the black line stand for the ΔNBE at 12:00 of 2013.02.18 (UTC)
图 6. 2013 年 2 月 18 日 12 时(UTC) 850 hPa 高度场(蓝色等值线), Ro 场($Ro \geq 0.7$, shaded), ΔNBE (黑色等值线)

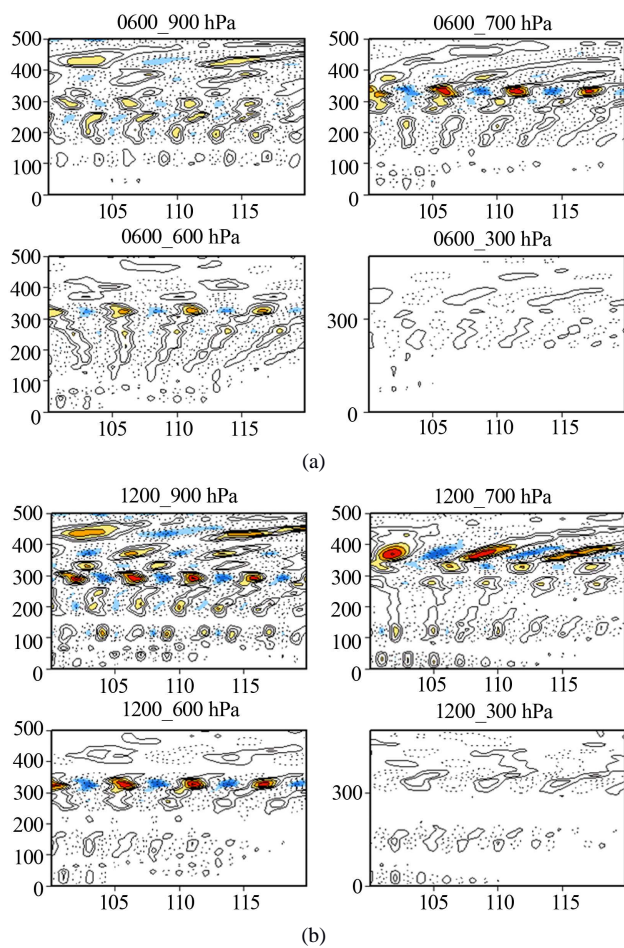


Figure 7. Wavelet coefficient of 06:00(a) and 12:00(b) (when the coefficient larger than 0.15, shaded)
图 7. 2013 年 2 月 18 日 06 时(a)和 12 时(b)小波系数分布场(小波系数绝对值大于 0.15, shaded)

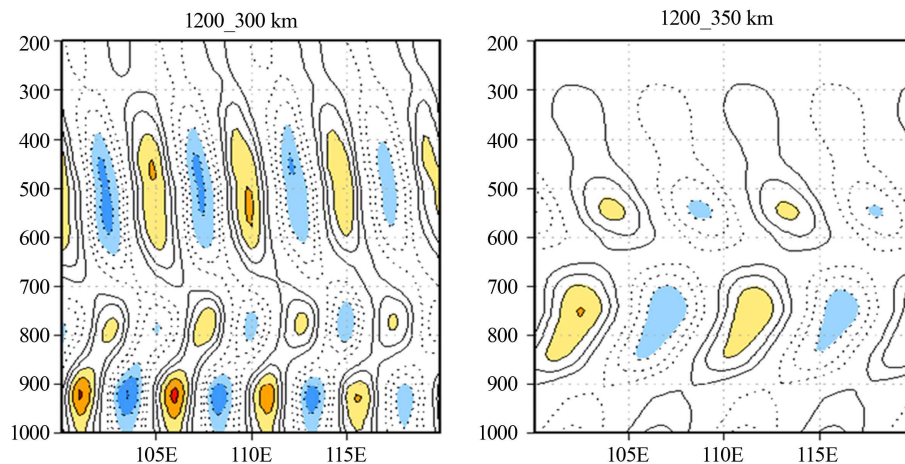


Figure 8. Wavelet coefficient of 300 km and 350 km height at 12:00 of 2013.02.18
 图 8. 2013 年 2 月 18 日 12 时(UTC)300 km、350 km 波段小波系数分布

数的密度达到极大值，也即 300 km 重力波在 400~600 hPa 和 900~960 hPa 附近波动最强。

6. 总结

此次重力波主要是由地转调整过程和垂直风切变激发，理查森数明显大于 0.25，而且非线性平衡项也有明显的大值，说明在此次重力波的生成发展中垂直风切变和地转调整都起到了重要作用。根据小波分析得出，此次重力波的波段主要集中在 300 km 左右，遍及整个对流层，在 500 hPa 和 950 hPa 附近波动最强。关于此次重力波的传播及其其他特征需要进一步研究。

参考文献 (References)

- [1] 黄荣辉, 陈金忠 (2002) 平流层球面大气地转适应过程和惯性重力波的激发. *大气科学*, **3**, 289-306.
- [2] Gossard, W.H. and Hook, E. (1975) *Waves in the atmosphere*. Elsevier, Amsterdam, 223.
- [3] Uccellini, L.W. and Koch, S.E. (1987) The synoptic setting and possible energy sources for mesoscale wave disturbances. *Monthly Weather Review*, **115**, 721-729.
- [4] 覃卫坚, 寿绍文, 高守亭, 等 (2010) 一次冰雹过程的惯性重力波观测及数值模拟. *地球物理学报*, **5**, 1039-1049.
- [5] 刘佳, 王文 (2010) 一次暴雨过程的重力波特征分析. *干旱气象*, **1**, 65-70.
- [6] 许小峰, 孙照渤 (2003) 非地转平衡流激发的重力惯性波对梅雨锋暴雨影响的动力学研究. *气象学报*, **6**, 655-660.
- [7] 覃卫坚, 寿绍文, 李启泰, 王咏青, 彭江良 (2007) 影响惯性重力波活动规律的动力学因子研究. *高原气象*, **3**, 519-524.
- [8] Zhang, F.Q. and Koch, S.E., Davis, C.A. and Kaplan, M.L. (2000) A survey of unbalanced flow diagnostics and their application. *Advances in Atmospheric Sciences*, **17**, 165-183.
- [9] Zhang, F.Q. and Koch, S.E., Davis, C.A. and Kaplan, M.L. (2001) Wavelet analysis and the governing dynamics of a large-amplitude mesoscale gravity-wave event along the East Coast of the United States. *Royal Meteorological Society*, **127**, 2209-2245.
- [10] 孙艳辉, 李泽椿, 寿绍文 (2011) 2007 年 3 月 3-5 日辽宁省暴雪和大风天气的中尺度分析. *气象学报*, **5**, 936-948.