

覃皓. 一次垂直切变不稳定背景下的重力波过程分析[J]. 气象研究与应用, 2022, 43(2): 09–15.

Qin Hao. Analysis on a gravity wave process under vertical shear instability environment[J]. Journal of Meteorological Research and Application, 2022, 43(2): 09–15.

一次垂直切变不稳定背景下的重力波过程分析

覃 皓

(广西壮族自治区气象台, 南宁 530022)

摘要: 利用常规气象观测数据以及再分析资料, 对 2022 年 1 月 30—31 日, 广西中部至南部出现大面积具有波动特征的带状回波过程中重力波的发展及传播进行了诊断分析。结果表明: (1) 此过程广西受南支槽前西南急流控制, 强垂直风切变为重力波的发展提供了扰动背景。广西位于锋面冷空气一侧, 低层静力稳定层结为重力波的传播提供了必要条件。(2) 此过程受到周期为 5~7h 的重力波影响。在过程初期, 切变不稳定增强对重力波具有激发作用。在波动成熟和维持阶段, 基本气流向重力波的能量输送, 弥补了波动传播过程中的能量耗散。Richardson 数具有较好的指示意义。(3) 波动中的上升运动将水汽向高层输送, 潜热加热的正反馈以及不稳定能量释放使得重力波的抬升扰动可以延展至更高层次。

关键词: 重力波; 切变不稳定; 急流; 理查逊数

中图分类号: P425

文献标识码: A

doi: 10.19849/j.cnki.CN45-1356/P.2022.2.02

引言

重力波是大气内部的基本波动之一。在稳定层结中, 气块在垂直方向受到扰动后在浮力和重力作用下产生周期性振荡, 这种浮力振荡在连续介质中传播形成重力波^[1]。重力波的活动对天气演变具有重要影响^[2,3]。在华南地区, 徐燚等^[4]研究表明重力波可作为暖区暴雨的触发机制之一, 重力波由锋面传播至暖区时, 其带来的散度或垂直速度扰动可以触发不稳定能量释放, 产生对流。Du 和 Zhang^[5]则发现重力波与对流间存在强烈的相互作用, 重力波可以触发并调控对流的发展, 而对流产生的潜热加热又对重力波起到正反馈作用。

关于重力波的发生发展机制, 前人研究表明, 高山地形^[2,6]、切变不稳定^[1,7]、急流^[8-9]、锋面^[4,10]以及对流^[5,11]等都可以触发重力波。其中, 当大气层结稳定时, 垂直方向上的切变不稳定常由高空急流造成的强垂直风切变引起, 切变越大对应重力波强度越

强^[12-13]。在垂直切变不稳定背景下, 重力波能够从环境气流中获得自身发展所需要的扰动能量^[14]。

冬季南支西风急流强盛, 位于 20°~30°N 之间, 正好覆盖广西上空。这种风速和风向随高度的大幅转变有利于垂直切变不稳的发展, 为重力波的激发提供扰动背景。然而前人对重力波个例的研究多集中于高海拔地区, 关于广西地区重力波过程的分析较少。因此, 本文选取 2022 年 1 月 30—31 日广西中部至南部的一次重力波过程进行分析诊断, 以进一步加深对重力波发展及传播机理的理解与认识。

1 资料和方法

采用常规气象观测资料, 天气雷达组合反射率资料以及欧洲中期天气预报中心 ERA5 逐小时再分析资料(分辨率 0.25°×0.25°, 包括位势高度、温度、比湿、风场和地表气压等)。

本文利用 Morlet 小波分析^[1,4]以及带通滤波诊断各物理量时间序列中的重力波信号。选取 $\partial\theta_{\infty}/\partial p>$

收稿日期: 2021-12-02

基金项目: 广西气象科研计划项目(桂气科 2022QN08、桂气科 2021Z03)、广西气象科研计划重点项目(2020Z05)、广西壮族自治区气象局短时临近天气预报技术创新团队项目

作者简介: 覃皓(1991—), 男, 硕士, 工程师, 主要从事灾害性天气诊断及预报研究。E-mail: 289055112@qq.com

0 作为层结对流不稳定判据, θ_{se} 为假相当位温。计算垂直水汽通量 $F_v = -\omega \cdot q$ 诊断水汽在垂直方向上的输送, ω 是以 $\text{Pa} \cdot \text{s}^{-1}$ 为单位的垂直速度, 则 $F_v > 0$ 表征水汽垂直向上输送。

利用 Richardson 数诊断上述过程中的切变不稳定, 其表达式如下:

$$Ri = \frac{g}{\theta} \left(\frac{\partial \theta}{\partial z} \right) / \left(\frac{\partial U}{\partial z} \right)^2 \quad (1)$$

其中, $\frac{g}{\theta} \left(\frac{\partial \theta}{\partial z} \right)$ 表征大气的层结稳定度, $\left(\frac{\partial U}{\partial z} \right)^2$ 则对应垂直风切变的强度。在稳定层结中, 垂直风切变越大则 Richardson 越小。以往研究常将 $Ri < 0.25$ 作为重力波不稳定发展的判据, 满足该条件时重力波可从基本气流中获得能量而发展, Richardson 数越小对应垂直切变不稳定越强。

2 过程概况

2.1 回波特征

2022 年 1 月 30 日 17 时—31 日 08 时, 广西中部至南部出现了大面积的带状回波, 回波自西南向

东北方向移动。回波带呈西北—东南向的横向排列, 与其移动方向垂直, 并表现出明显的波动特征(图 1)。17—19 时, 百色、南宁和崇左一带出现零星的分散回波, 强度较弱, 反射率因子在 30dBZ 左右(图 1a)。19—22 时, 零星回波逐渐变得密集, 沿其移动方向开始呈现波动排列特征, 强度也有所增强(图 1b)。23 时—31 日 01 时, 桂南沿海一带也出现与上述回波相似特征的回波带, 沿西南东北向排列成串。随后桂西南一带不断有回波生成并向东北方向移动(图 1c)。02—05 时, 这种波动形势最为显著, 范围覆盖桂中、桂南, 回波强度达到最强, 中心达 40dBZ 以上(图 1d、1e)。06—08 时, 桂中地区的波动形势逐渐减弱, 而桂南一带仍维持(图 1f), 在 09 时以后才逐渐衰退。

受上述回波影响, 广西出现了中到大雨程度的较强降水, 过程产生自南向北三条雨带, 雨带排列与回波移动方向(波列)平行, 分别对应图 1c 中的线段 AB、CD 和 EF。此外, 由于 AB、CD 和 EF 的垂直剖面上存在相似的特征, 下文主要给出 AB 剖面的结果。

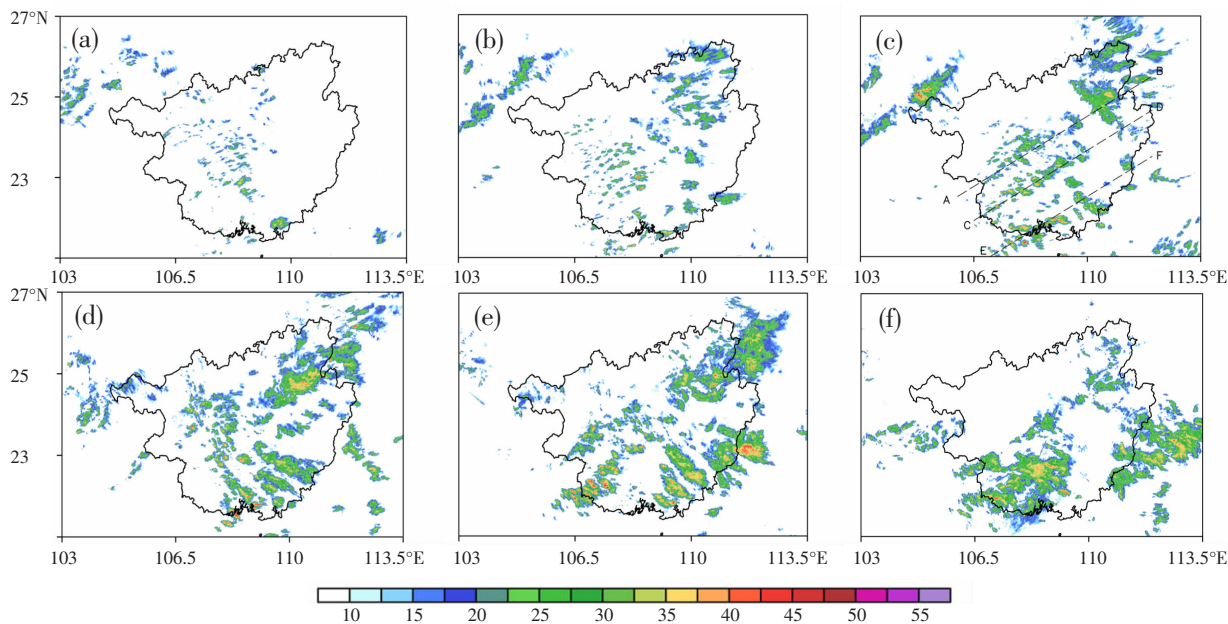


图 1 2022 年 1 月 SWAN 雷达组合反射率(单位: dBZ)

(a)30 日 19:00; (b)30 日 21:30; (c)30 日 23:30; (d)31 日 02:30; (e)31 日 04:30; (f)31 日 07:00

2.2 环流形势

整个过程广西处于 500hPa 南支槽前的西南气流中, 南支槽维持在 100°E 附近, 槽前西南气流逐渐增强达到急流标准。30 日 14 时桂南一带 500hPa 风速达到 $25\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$, 随后急流范围逐渐增大, 20 时已经

覆盖整个广西上空, 其中桂中桂南一带风速达到 $30\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。低层 850hPa 上切变线位于黔桂交界, 广西上空为东南气流, 桂南一带风速在夜间 20 时至 31 日 05 时左右达到急流强度, 具有较好的水汽输送条件。高低层的风场配置构成了明显的垂直风切变。此

外,地面冷锋位于沿海,整个过程发生在冷空气一侧。

2.3 环境条件

此次过程发生在桂中桂南一带,因此选取 30 日 20 时南宁和北海的探空进行分析。在热力条件上,两个区域上空均呈现上干下湿的层结特征,在 600hPa 以下大气均为饱和状态。其中,南宁站探空显示在冷垫之上的 925~850hPa 存在一个静力稳定层结,温度随高度递增,这一特征在北海探空曲线上也有所体现。静力稳定层结的存在为重力波的传播提供了必要条件^[7]。动力条件上,强垂直风切变是激发重力波波源的重要因子^[8,13]。南宁和北海探空站均显示出明显的风场随高度转变,在近地面层为偏东风,随高度增高风速递增并逐渐顺时针旋转为强西风,0~6km 垂直风切变分别约为 $36\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 和 $30\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$,均属于强的深厚垂直风切变。

3 重力波诊断

以上分析表明,环流形势以及环境条件具备了重力波产生和传播的必要条件,同时雷达回波也存在明显的波动特征,以下进一步证实此次过程中存在重力波的活动,并讨论其发展和传播规律。

3.1 重力波判别

提取垂直速度的波动信号可以较好地识别重力波^[4,7]。考虑到南宁站上空的大气层结有利于重力波传播,同时 925hPa 上垂直速度由西南向东北方向呈现出正负相间的分布特征(图 2),取南宁探空站附近格点(108°E , 23°N)925hPa 的垂直速度时间序列进行小波分析。结果如图 3a 所示,垂直速度在 30 日

16 时至 31 日 08 时存在显著的 5~7h 波动周期,在该阶段重力波的活动信号最为明显,这也与雷达反射率呈现出波动特征的时间段相符(16 时已有零星弱回波出现)。其中,波动能量在 30 日 22 时—31 日 07 时达到最强,对应回波强度也达到最大(图 1c—1e,图 2)。

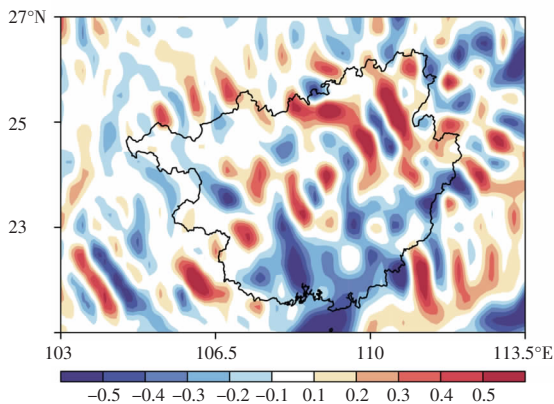


图 2 2022 年 1 月 31 日 00 时 925hPa 垂直速度
(单位: $\text{Pa}\cdot\text{s}^{-1}$)

为进一步验证上述重力波信号,对该点 30 日 08 时—31 日 20 时 925hPa 位温、垂直速度以及地表气压标准化时间序列进行 5~7h 带通滤波。可以看到,16 时以后位温、垂直速度以及地表气压存在明显的相位差。位温最大扰动超前于垂直速度最大值,而地表气压最大扰动又落后于后者,三者间位相差 $\pi/2$ (图 3b),符合重力波的极化特征^[5,15-16]。

综上可以证实,此次过程受到周期为 5~7h 的重力波影响。

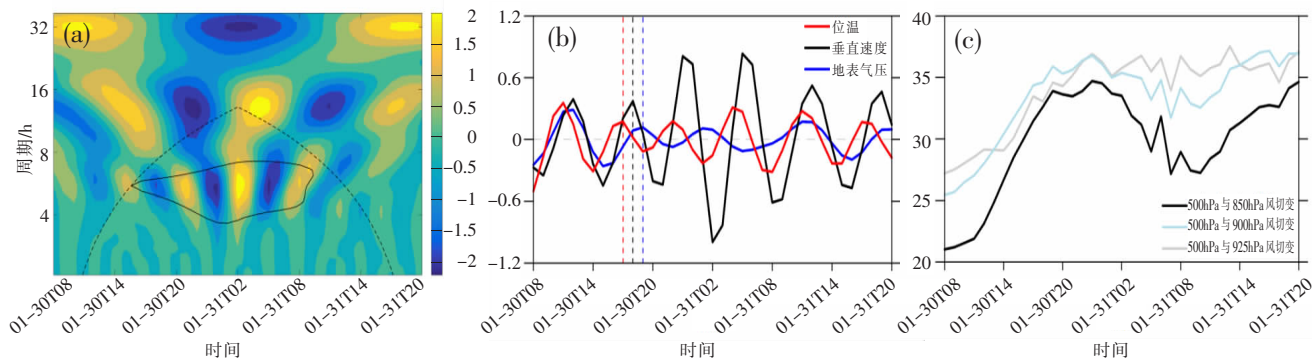


图 3 2022 年 1 月 30 日 08 时—31 日 20 时点(108°E , 23°N)上(a)925hPa 垂直速度时间序列的小波分析(粗实线表示通过 95%信度水平的显著性检验,粗虚线表示边界效应影响区), (b)5~7h 带通滤波的 925hPa 位温、垂直速度和地表气压的标准化时间序列(分别为红线、黑线和蓝线), (c)500hPa 和 850hPa、900hPa 以及 925hPa 的垂直风切变时间序列(分别为黑线、浅蓝线和灰线,单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)

3.2 重力波发展

当稳定层结存在时,较强的垂直风切变能促进重力波的发展,重力波随风速垂直切变增大而增

强^[13,17]。图 3c 表明 30 日傍晚到夜间垂直风切变存在逐渐增强的过程。在 14 时左右,中低层间的垂直风切变开始增强,在 16 时开始维持较大强度,对应

此时开始出现明显的极化特征(图 3b)。在 31 日后半夜 07 时左右,垂直风切变有一定的减弱,此时波动特征也逐渐消失(图 1f,3a)。可见,垂直风切变带来的不稳定对重力波的发展具有重要贡献。

由图 4(a—c)所示,30 日 18 时, Richardson 数小于 0.25 的区域主要位于桂西南一带(图 4a),此时该地区存在零星弱回波,波动特征还不明显。30 日 19 时—31 日 00 时,切变不稳定区域进一步向东北方向扩展,不稳定强度也随之增强,31 日 00 时广西已大部处于较强的切变不稳定环境中(图 4b,4c),

在该阶段重力波逐渐发展成型,波动状回波的分布也与 Richardson 低值区大致对应(图 1b,1c)。

重力波的成熟及维持需要从环境基本气流(平均流)中获得扰动动能,以补充波动传播过程中能量的外泄,而 Richardson 数的增大可以反映出基本气流向重力波的能量传递过程^[1,5,7]。由线段 AB 的垂直剖面可见,30 日 20 时,低对流层内存在较强的切变不稳定(图 4d),随后在 925hPa 附近 Richardson 数不断增大(图 4e,4f),表明此时重力波不断从基本气流获取能量,对应波动特征的发展成熟(图 1e,1f)。

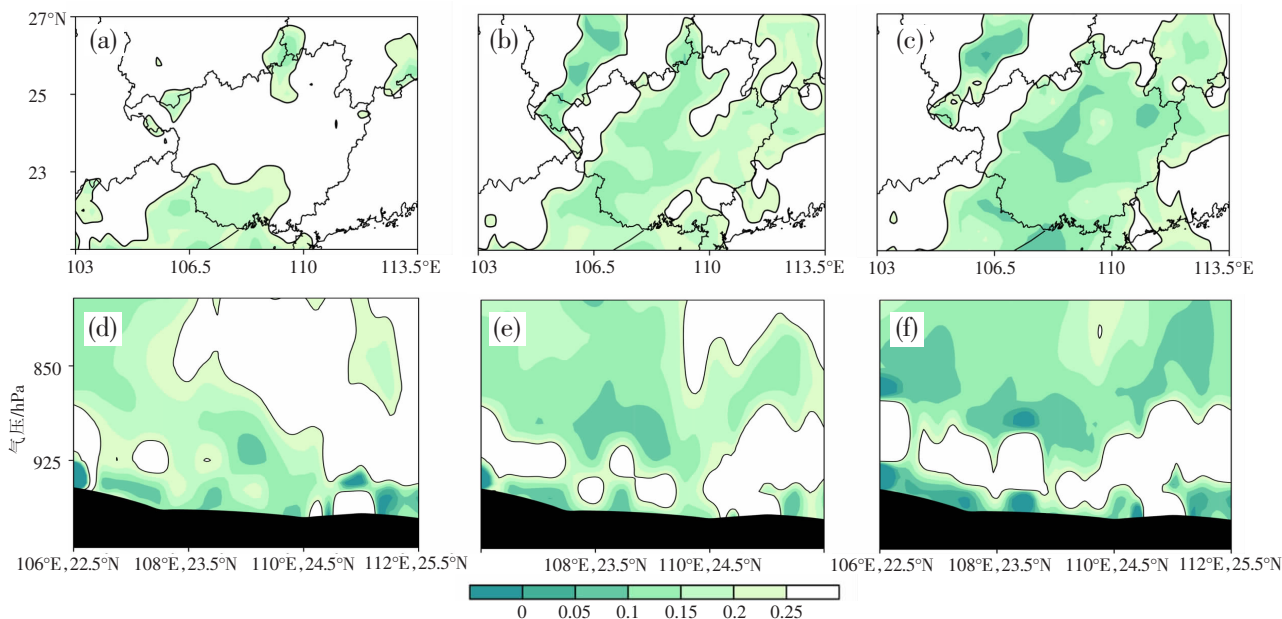


图 4 2022 年 1 月(a)30 日 18:00、(b)30 日 21:00、(c)31 日 00:00 875hPa 以及 (d)30 日 20:00、(e)23:00、(f)31 日 04:00 线段 AB 垂直剖面上 Richardson 数分布

3.3 重力波传播

选取重力波发展成熟阶段(31 日 01—05 时)分析其传播特征(图 5)。由垂直速度和位温的分布可见,垂直速度在近地面层至 850hPa 呈明显的波动特征,正负值(上升与下沉运动)交替分布,而等位温线也表现为波动状,并且波谷(波峰)对应于垂直速度的平衡位置,满足垂直速度场与等位温面相差 $\pi/2$ 位相的重力波极化特征(图 5a—5e)。相应地,垂直运动与水平散度互相匹配,因而散度也呈现出正负交替分布(图 5f—5j),上升(下沉)运动对应低层辐合(辐散)、高层辐散(辐合)。

值得注意的是,在重力波传播过程中,其抬升扰动的影响可以向上延展至更高的层次,促进高层上升运动的增强,这与 Wave-CISK 机制有关^[1,5,18]。如 31 日 01 时,在(108°E,23.5°N)西南侧上空 700hPa

有一强上升中心,垂直速度达到 $-0.9\text{Pa}\cdot\text{s}^{-1}$ (图 5a)。随着重力波传播,02 时在(108°E,23.5°N)东北侧 850hPa 为重力波引起的辐合抬升,上升运动使得水汽不断向高层输送(图 5b,5g 和 5l)。水汽来到饱和层结中凝结释放潜热(由探空曲线以及图 5k—5o 的比湿分布可知,850~700hPa 为饱和层并且绝对水汽量较低层更大),同时上升带来的绝热冷却进一步促进了水汽相变,大量的潜热加热反馈使得上升运动向更高的层次延伸,造成更多的水汽凝结至雨。此外,800hPa 以上为对流不稳定层结(图 5f—5j),当上升气流达到该高度时触发了不稳定能量释放,位能向动能的转换进一步增强了上升运动,促进了对流发展^[17]。在上述机制下,原强上升运动中心不断向下游发展传播,并且维持在 800hPa 以上。03 时,强上升中心传播至(109°E,24°N)附近,可以明显看到强

上升区由 925hPa 向上伸展至 600hPa (图 5c), 同时在对对应区域存在一支向上的水汽输送带 (图 5m), 验证了上述机制。这种上升气流从冷垫向上贯穿的配置也与一般的高架对流有所区别^[19-20]。到了 05 时, 强

上升区已经传播到 (110°E, 24.5°N) 东北侧, 随着重力波能量的耗散, 此时上升强度已经减弱至 $-0.7\text{Pa}\cdot\text{s}^{-1}$ (图 5e), 水汽的垂直输送也相应减弱 (图 5o)。

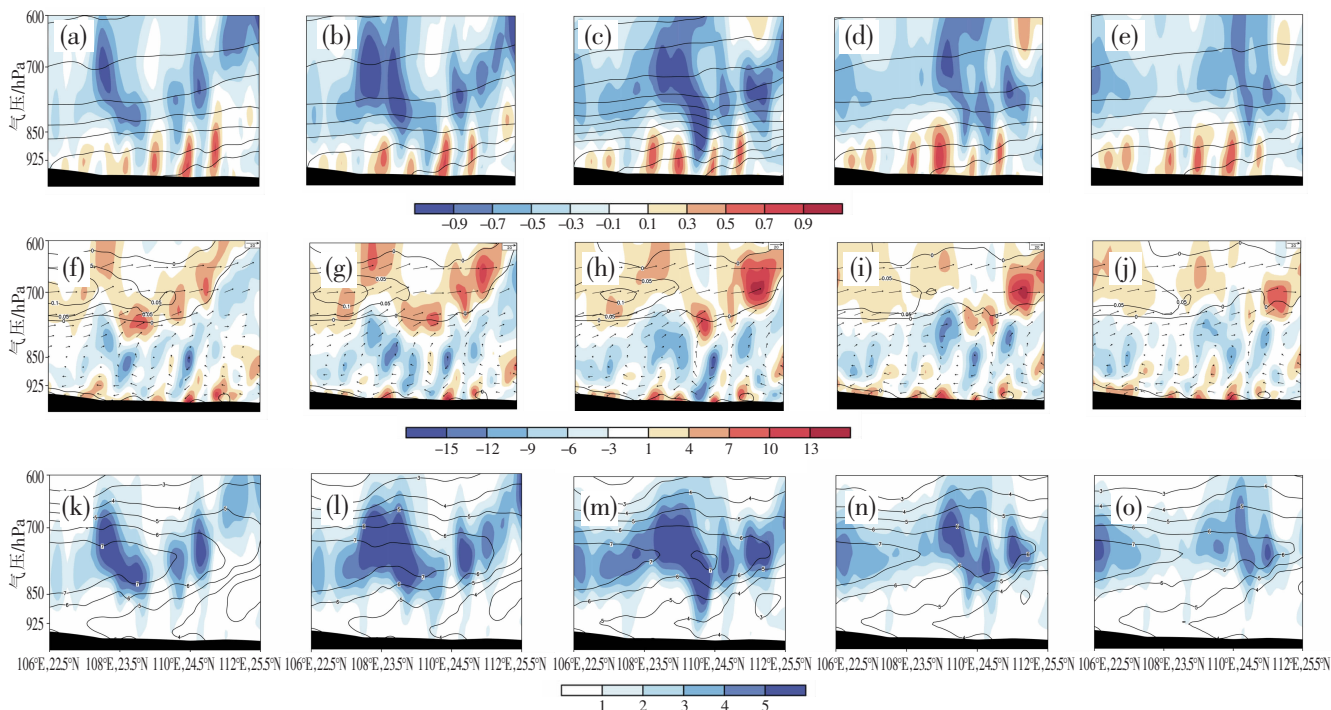


图 5 2022 年 1 月 31 日 01 时—05 时线段 AB 垂直剖面上 (a-e) 垂直速度 (填色, 单位: $\text{Pa}\cdot\text{s}^{-1}$) 和位温 (等值线, 单位: K), (f-j) 散度 (填色, 单位: 10^{-5}s^{-1})、对流稳定度 (等值线, 只显示不稳定区, 单位: $\text{K}\cdot\text{hPa}^{-1}$) 和环流 (垂直速度放大 10 倍), (k-o) 比湿 (等值线, 单位: $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$) 和垂直水汽通量 (填色, 单位: $\text{g}\cdot\text{Pa}\cdot\text{s}^{-1}$)

综上, 给出此次过程重力波活动的示意图 (图 6)。

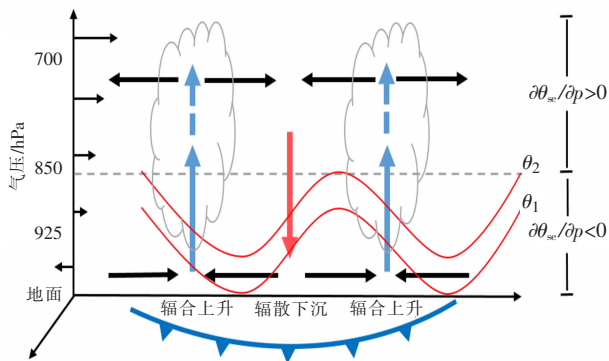


图 6 重力波活动示意图

(红色曲线为等位温线, 蓝色实箭头为重力波上升支, 蓝色虚箭头为 Wave-CISK 正反馈)

4 结论

2022 年 1 月 30 日—31 日广西中部至南部出现了大面积具有波动特征的带状回波, 本文基于常

规观测以及 ERA5 再分析资料对此次过程中重力波的发展及传播进行了诊断分析, 得出以下结论:

(1) 整个过程广西受南支槽前西南急流控制, 强垂直风切变为重力波的发展提供了扰动背景。广西位于锋面冷空气一侧, 低层静力稳定层结为重力波的传播提供了必要条件。

(2) 小波分析表明此次过程受到周期为 5~7h 的重力波影响。在过程初期, Richardson 数的减小对应于重力波的发展, 体现了切变不稳定对重力波的激发作用, 具有较好的指示意义。在波动成熟和维持阶段, Richardson 数的增大则反映了基本气流向重力波的能量输送, 弥补了波动传播过程中的能量耗散。

(3) 重力波在稳定层结中传播时, 波动中的上升运动将水汽向高层输送, 潜热加热的正反馈作用使得抬升扰动可以延展至更高层次。在逆温层之上, 上升气流的发展触发了不稳定能量释放, 进一步增强了上升运动, 对降水具有一定增幅作用。

本文主要讨论了垂直切变不稳对此次重力波过

程发生发展的影响,而关于非地转的作用并未提及。在高空急流出口区附近存在明显的非地转运动,由此引发的地转适应过程同样可以激发重力波^[8,21],而地转适应过程又提前于切变不稳定的产生^[17,22],这对于短时预报具有重要意义^[23-24]。因此未来工作中需要进一步考虑非地转平衡的影响。

参考文献:

- [1] 谢家旭,李国平.重力波与对流耦合作用在一次山地突发性暴雨触发中的机理分析[J].大气科学,2021,45(3):617-632.
- [2] 吴琼,梅海霞,秦孟晟,等.一次大暴雨过程中地形重力波拖曳作用的研究[J].气象研究与应用,2021,42(2):7-12.
- [3] 朱莉,丁治英,张腾飞,等.重力波与低纬高原地区M β CSs地域特征的关系[J].大气科学学报,2010,33(5):561-568.
- [4] 徐燚,闫敬华,王谦谦,等.华南暖区暴雨的一种低层重力波触发机制[J].高原气象,2013,32(4):1050-1061.
- [5] Du Y, Zhang F Q. Banded Convective Activity Associated with Mesoscale Gravity Waves Over Southern China [J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 2019, 124(4):1912-1930.
- [6] 桑建国,李启泰.小尺度地形引起的切变重力波 [J].气象学报,1992,50(2):227-231.
- [7] 吴迪,王澄海,何光碧.青藏高原地区夏季两次强降水过程中重力波特征分析[J].高原气象,2016,35(4):854-864.
- [8] Uccellini L W, Koch S E. The Synoptic Setting and Possible Energy Sources for Mesoscale Wave Disturbances [J]. Monthly Weather Review, 1987, 115(3):721-729.
- [9] Zhang F Q, Davis C A, Kaplan M L, et al. Wavelet Analysis and the Governing Dynamics of a Large-Amplitude Mesoscale Gravity-Wave Event along the East Coast of the United States [J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 2001, 127:2209-2245.
- [10] Gall R, Williams R T, Clark T L. Gravity Waves Generated during Frontogenesis [J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 1998, 45(15):2204-2220.
- [11] Piani C, Alexander M J, Holton J R, et al. A Numerical Study of Three-Dimensional Gravity Waves Triggered by Deep Tropical Convection and Their Role in the Dynamics of the QBO [J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 2000, 57(22):3689-3702.
- [12] Lane T P, Doyle J D, Plougonven R. Observations and Numerical Simulations of Inertia-Gravity Waves and Shearing Instabilities in the Vicinity of a Jet Stream [J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 2004, 61(22):2692-2706.
- [13] 覃卫坚,寿绍文,李启泰,等.影响惯性重力波活动规律的动力学因子研究[J].高原气象,2007,26(3):519-524.
- [14] Fritsch J M, Chappell C F. Numerical Prediction of Convectively Driven Mesoscale Pressure Systems, Part I: Convective Parameterization [J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 1980, 37(8):1722-1733.
- [15] Eom, Kyung J. Analysis of the Internal Gravity Wave Occurrence of 19 April 1970 in the Midwest [J]. Monthly Weather Review, 1975, 103(3):217-226.
- [16] Koch S E, O'Handley C. Operational Forecasting and Detection of Mesoscale Gravity Waves [J]. Weather and Forecasting, 1997, 12(2):253-281.
- [17] 王文,刘佳,蔡晓军.重力波对青藏高原东侧一次暴雨过程的影响[J].大气科学学报,2011,34(6):737-747.
- [18] Zhang D L, Fritsch J M. Numerical Simulation of the Meso- β Scale Structure and Evolution of the 1977 Johnstown Flood. Part I: Model Description and Verification [J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 1986, 43(18):1913-1944.
- [19] 董良森,农孟松,梁俊聪,等.华南西部高架冰雹强对流天气过程的特征及成因分析[J].广西科学院学报,2015,31(2):139-147,154.
- [20] 吕晓娜.2015年河南首场区域暴雪伴高架雷暴过程分析[J].气象研究与应用,2015,36(4):45-52,132.
- [21] Ruppert J H, Koch S E, Chen X, et al. Mesoscale Gravity Waves and Midlatitude Weather: A Tribute to Fuqing Zhang [J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2021, 103(1):129-156.
- [22] 王文,程攀.一次暴雨过程数值模拟与诊断分析[J].气象与环境学报,2013,29(1):1-11.
- [23] 林开平,陈伟斌,刘国忠,等.广西暴雨业务预报技术回顾与展望[J].气象研究与应用,2020,41(4):13-19.
- [24] 苏兆达,潘杰丽,梁岱云,等.广西对流尺度数值预报模式产品在南宁的应用初探 [J]. 气象研究与应用, 2022, 43(1):66-72.

Analysis on a gravity wave process under vertical shear instability environment

Qin Hao

(Guangxi Meteorological Observatory, Nanning 530022, China)

Abstract: Based on the conventional observation and reanalysis data, the development and propagation of gravity wave in the process of large-area band echo with fluctuating characteristics from central to southern Guangxi from January 30 to 31, 2022 were diagnosed and analyzed. The results showed that (1) Guangxi was controlled by the southwest jet in front of the south branch trough during the whole process, and the strong vertical wind shear provided the disturbance background for the development of gravity waves. On the cold side of the front, the static stable layer in low level provided the necessary conditions for gravity wave propagation. (2) Wavelet analysis showed that the process was affected by gravity waves with a period of 5~7h. In the early stage of the process, the enhanced shear instability excited the gravity wave. During the wave maturation and maintenance stage, the energy transferred from the basic flow to the gravity wave compensating the energy dissipation by the wave propagation. The Richardson number has a good indicative significance in the above process. (3) The upward motion of the wave transported water vapor to the upper level, and the positive feedback of latent heating and unstable energy release made the gravity wave uplifting disturbance extend to a higher level.

Key words: gravity wave; shear instability; jet stream; Richardson number