

覃皓. 广西一次冷空气过程前后 Rossby 波作用的对比分析[J]. 气象研究与应用, 2021, 42(4): 38–43.

Qin Hao. Comparative analysis of Rossby wave before and after a cold air process in Guangxi [J]. Journal of Meteorological Research and Application, 2021, 42(4): 38–43.

广西一次冷空气过程前后 Rossby 波作用的对比分析

覃 皓

(广西壮族自治区气象台, 南宁 530022)

摘要: 基于 T-N 波作用通量以及 NCEP/NCAR 再分析资料, 对比分析了 2016 年 1 月广西一次强冷空气过程前后两个阶段中大尺度环流以及 Rossby 波的调制作用。结果表明, 冷空气活动过程前后阶段大气环流存在明显差异。第一阶段中欧亚中高纬地区阻塞形势明显, 低纬度地区环流平直。第二阶段中欧亚低纬地区环流经向度增大, 南支槽发展活跃; 两个阶段中欧亚大陆上空均存在南北两支 Rossby 波列。第一阶段中北支波列调控了乌拉尔高压脊的发展以及横槽转竖, 而南支波列调控了印缅槽的减弱, 两者协同使冷空气更易南下。第二阶段南支波列主导了南支槽的发展东移, 为该阶段降水提供了动力抬升以及水汽条件; NAO 与南北两支波列的活动密切相关, NAO 由负到正的位相转变是第二阶段南支波列增强的可能原因。

关键词: Rossby 波; 冷空气; 波作用通量; 环流

中图分类号: P458

文献标识码: A

doi: 10.19849/j.cnki.CN45-1356/P.2021.4.07

OSID:

引言

Rossby 波频散理论指出, 西风带上 Rossby 波能量向下游传播的速度可能快于其扰动本身, 因此在扰动未到达时下游地区就有新的扰动发展^[1]。该理论的提出加深了人们对大气内部动力过程的认识, 推动了行星波动力学的发展^[2]。近年来极端天气事件日益频发, 大尺度的环流异常是众多研究关注的重点, 而这之中大气内部行星波的活动扮演着重要角色^[3-5]。

我国地处欧亚大陆东岸, 由于“下游效应”, 常受上游地区传播而来的 Rossby 波影响^[6]。上游地中海至里海地区激发的 Rossby 波能量频散偏强时, 我国南方地区上空高空急流在波流相互作用下增强, 有利于出现降水正异常; 而当波源区波能量频散偏弱时, Rossby 波能量以经向传播为主, 有利于北方降水发展^[5]。不仅如此, 在亚洲急流出口区, Rossby 波能量频散能导致槽(脊)发展进而影响长江中下游地

区的降水^[7]。还有研究指出我国极端低温事件也与 Rossby 波活动密切相关, 当冬季欧亚大陆上空的瞬变 Rossby 波活跃时, 我国极端低温事件频发^[8]。关于冷空气异常活动的动力学机制, 许多工作则强调了 Rossby 波列调控欧亚中高纬阻塞形势的贡献。可见, 大气 Rossby 波活动对我国天气气候具有重要影响。

广西位于我国低纬度地区, 冬季受东北季风控制, 降水较少。然而在 2016 年 1 月 19—29 日广西出现了大范围的低温雨雪天气, 多地气温突破历史最低值。此次冷空气活动过程分为两个阶段, 第一阶段(19—25 日)以降温为主, 雨雪较少, 第二阶段(26—29 日)则转为明显降水, 多个观测站突破建站以来 1 月份日降水极值^[9]。关于此次过程的研究多关注于第一阶段的寒潮过程^[10], 而对于后期降水激增的讨论较少。此外, 两个阶段中大气环流存在明显差异, 而大尺度形势的调整又与大气波动有关。因此, 从大气内部动力学角度, 讨论此次冷空气活动过程前后

收稿日期: 2021-09-28

基金项目: 广西科技计划项目(桂科 AB21075008)、广西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分析及预报研究。E-mail: 289055112@qq.com

阶段 Rossby 波作用的差异,加深对天气演变过程中波流相互作用的理解与认识。

1 资料和方法

采用美国环境预报中心和国家大气环境研究中心(NCEP/NCAR)的逐日再分析资料,分辨率 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ 。美国大气海洋局(NOAA)提供的逐日北大西洋涛动(North Atlantic Oscillation, NAO)指数。

通过计算 T-N(Takaya and Nakamura)波作用通量^[11]来诊断大气 Rossby 波能量的传播,并计算其散度以表征波动能量的汇聚和发散。相较于局地 E-P(Elisassen-Palm)通量^[12]以及 Plumb 波作用通量^[13], T-N 波作用通量能更好地描述西风带纬向非均匀气流中较大振幅的 Rossby 波扰动,对于北半球冬季对流层 Rossby 波活动的诊断具有更好的适用性^[14],其表达式如下:

$$W = \frac{p \cos \varphi}{2|U|} \cdot \left\{ \frac{U}{a^2 \cos^2 \varphi} \left[\left(\frac{\partial \psi'}{\partial \lambda} \right)^2 - \psi' \frac{\partial^2 \psi'}{\partial \lambda^2} \right] + \frac{V}{a^2 \cos \varphi} \left[\frac{\partial \psi'}{\partial \lambda} \frac{\partial \psi'}{\partial \varphi} - \psi' \frac{\partial^2 \psi'}{\partial \lambda \partial \varphi} \right] \right. \\ \left. + \frac{U}{a^2 \cos \varphi} \left[\frac{\partial \psi'}{\partial \lambda} \frac{\partial \psi'}{\partial \varphi} - \psi' \frac{\partial^2 \psi'}{\partial \lambda \partial \varphi} \right] + \frac{V}{a^2} \left[\left(\frac{\partial \psi'}{\partial \varphi} \right)^2 - \psi' \frac{\partial^2 \psi'}{\partial \varphi^2} \right] \right. \\ \left. + \frac{f^2}{N^2} \left[\frac{U}{a \cos \varphi} \left(\frac{\partial \psi'}{\partial \lambda} \frac{\partial \psi'}{\partial z} - \psi' \frac{\partial^2 \psi'}{\partial \lambda \partial z} \right) + \frac{V}{a} \left(\frac{\partial \psi'}{\partial \varphi} \frac{\partial \psi'}{\partial z} - \psi' \frac{\partial^2 \psi'}{\partial \varphi \partial z} \right) \right] \right\} \quad (1)$$

式中 $\psi' = \frac{\Phi'}{f}$ 为准地转流函数扰动, $f = 2\Omega \sin \varphi$,

$U=(U, V)$ 为气候背景流场, $\varphi, \lambda, \Phi, \Omega$ 和 a 分别为纬度、经度、位势、地球自转速率和地球半径。此外,为更好地反映当前季节内 Rossby 波传播异常,选取多年平均的当月气候场(1981—2010 年 1 月)作为气候背景场^[14]。

参考陈海山等^[8]的方法,计算扰动动能 $K' = (\overline{u'^2} + \overline{v'^2})/2$, 反映 Rossby 活动的强弱和位置,其中 u' 和 v' 分别为扰动纬向风和扰动经向风。

2 冷空气过程概况

2016 年 1 月 18—19 日, 500hPa 上欧亚中高纬为两槽一脊形势, 乌拉尔山东侧为高压脊, 向北伸展至 65°N 附近。贝加尔湖东侧为一冷涡, 伴随横槽从贝加尔湖向西南延伸至巴尔喀什湖, 槽内冷空气堆积。20—21 日, 乌拉尔高压脊向极发展, 形成阻塞形势, 阻高内暖空气挤压高纬度冷空气使其进一步向横槽内聚集。此时低层切变南压至华南北部, 冷空气前锋开始影响广西, 地面温度负距平达到 $-7 \sim -4^{\circ}\text{C}$ 。22—23 日贝加尔湖东侧冷涡南压, 横槽转竖, 冷空气快速向南倾泻。24—25 日冷空气南下迅速, 雪线直达南海。在这一阶段中, 印缅槽在 20 日前后由盛

转衰。在 21 日之后, 低纬度地区孟加拉湾至广西一带的环流变得平直, 一方面有利于冷空气快速南下, 另一方面导致水汽经向输送减弱, 最终使得过程带来的雨雪不明显, 以降温为主。

26 日, 广西仍为冷空气控制, 但此时南支槽开始发展, 位于 95°E 附近。对流层低层 850hPa 已由偏北风转为偏南风, 风速达到急流标准。27—28 日高原短波槽与南支槽合并东移, 欧亚低纬度区环流经向度增大, 广西受南支槽前强盛西南急流控制, 500hPa 上风速超过 $30\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。低层切变南压至广西中北部, 冷空气与暖湿气流交汇造成广西中南部出现中到大雨。29 日南支槽发展东移至 105°E 附近, 槽前正涡度平流增强配合低层切变造成了广西东南部地区大暴雨量级的降水。30 日南支槽东移减弱, 地面冷空气南压入海, 过程结束。

可以看出, 此次冷空气活动过程前后的两个阶段大气环流存在明显差异。第一阶段中高纬环流经向度大, 阻塞形势明显, 冷空气强势南下, 而低纬度地区环流平直, 水汽输送条件差, 导致降温明显而降水较少。第二阶段低纬度地区南支槽发展活跃, 槽前暖湿气流强盛并与冷空气在广西交汇造成明显降水。

3 Rossby 波的调制作用

冬季欧亚大陆上空常有南北两支 Rossby 波活动, 分别调控了低纬以及中高纬环流形势的演变, 在冷空气活动过程中扮演不同的角色^[8, 15]。下面进一步讨论这次过程前后阶段大气 Rossby 波异常的影响。

3.1 Rossby 波活动对过程的影响

扰动动能反映了 Rossby 波活动的强弱及位置。由扰动动能的分布可以看到, 两个阶段中欧亚大陆上空均存在南北两支 Rossby 波列(图 1)。第一阶段中北支波列强度更强, 由北大西洋上空途径东欧平原、乌拉尔山、贝加尔湖, 一直到东亚沿岸都具有较强的扰动动能。相较而言, 南支扰动动能小得多, 从黑海至伊朗高原能量不断衰减(图 1a)。第二阶段中, 北支波列在贝加尔湖西侧仍然存在较高的扰动动能。南支波列相比第一阶段存在明显的增强, 从地中海经阿拉伯海、孟加拉湾一直到我国华南地区均存在较强的扰动能量(图 1b)。

通过计算 T-N 波作用通量, 可以更清楚地看到前后阶段中南北两支 Rossby 波列能量的传播特征。在第一阶段中, 北支波列能量由西欧地区向东传播, 最终停滞于我国华北—东北一带, 调控了中高纬度

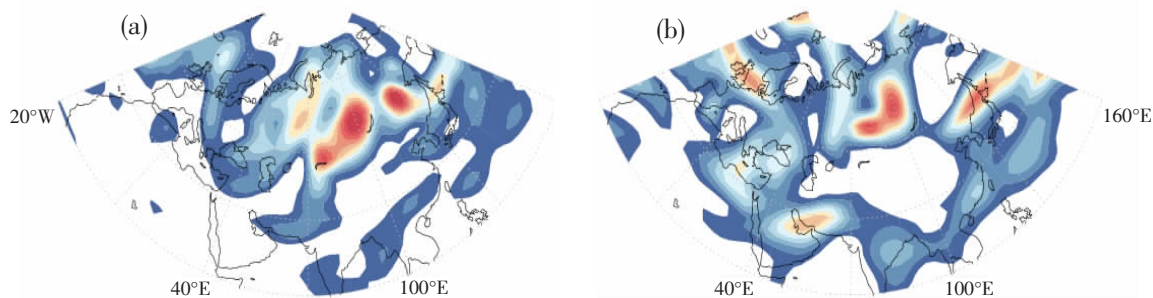


图1 2016年1月19日—22日(a),26日—29日(b)500hPa上 K' 分布(单位: $\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$)

的两槽一脊形势,使欧亚大陆中高纬度地区上空高度距平呈“负-正-负”分布(图2a)。南支波列能量由地中海向东南方向传播,停滞于印度半岛,主要影响了低纬度地区的伊朗脊和印缅槽。第二阶段中北支波列能量从里海向东北方向的乌拉尔阻塞高压内传播,之后又转向东南方向,途径贝加尔湖冷涡后与南

支波列在日本岛一带汇合,主要影响了阻塞高压东移以及低涡入海。南支波列的能量传播与第一阶段不同,波能量在到达印度半岛后并未停滞,进一步东传至西北太平洋,调控了南支槽的东移发展,槽区内为 $-140\sim-100\text{gpm}$ 的高度距平(图2b)。

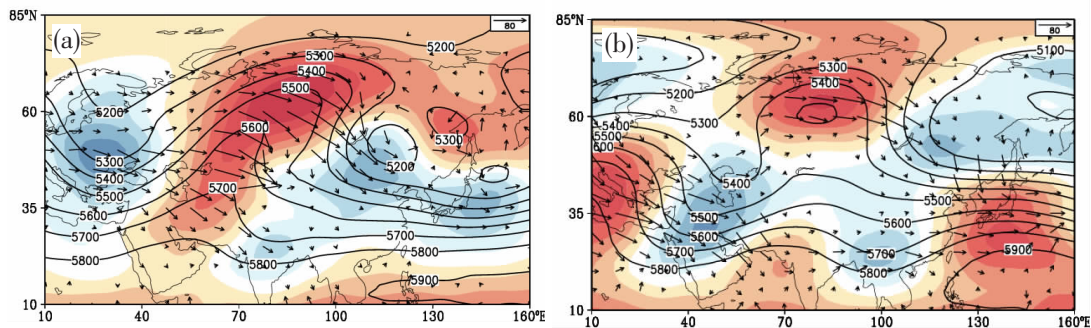


图2 2016年1月19日—22日(a),26日—29日(b)平均500hPa位势高度(实线,单位: gpm)及其距平(填色,单位: gpm),波作用通量(箭头,单位: $\text{m}^2\cdot\text{s}^{-2}$)

3.2 波活动通量逐日演变

图1、2反映了前后两个阶段中Rossby波活动的强弱以及分布特征,下面计算逐日的波作用通量及其散度,讨论Rossby波作用随时间的演变情况。

2016年1月19日,乌拉尔高压脊及其东北方向的高纬度横脊附近均有来自偏西方向的波作用通量,波能量在脊前辐合,这支起源于西欧冷涡附近的Rossby波促进了后期乌拉尔阻塞以及横槽形势的建立(图3a)。在低纬度地区,另一支Rossby波的波作用通量由地中海一带向东南方向指向印缅地区,促进印缅槽发展。20日,中高纬波源区东移,乌拉尔高压脊发展强盛并开始向其东南方向频散波能量,波作用通量在下游辐合增强了贝加尔湖冷涡及横槽,有利于冷空气在此堆积(图3b)。与此同时,印缅槽东移至 75°E 附近,槽前有暖湿气流向广西输送。

到了21日,贝加尔湖至我国华北一带基本为波作用通量辐合区,横槽达到最强盛时期(图3c)。低纬地区南支波作用通量开始减弱,这导致印缅槽随之减弱,印度半岛至华南一带的环流逐渐平直,向广西输送的水汽减少。22—23日,横槽开始转竖,槽区波作用通量向南辐散,冷空气迅速南下(图3d)。总体而言,此阶段Rossby波作用通量传播终点比常年更为偏南、偏西^[15],有利于寒潮爆发后影响区域更为偏南。

第二阶段的26日,贝加尔湖冷涡已东移至 130°E 附近,横槽转竖后位于我国黄海上空,槽后冷空气南下,但强度远不如第一阶段。然而此时南支扰动明显增强,中东槽发展强盛,槽内向东南方向频散的Rossby能量在阿拉伯脊区内转向东传播,在孟加拉湾至华南地区辐合,使南支槽得以发展增强(图

3e)。27 日中东槽东移, 南支槽内波作用通量进一步增强, 受波作用通量影响南支槽进一步发展, 东移至 95°E 附近(图 3f)。此时低纬地区经向度增大, 南支槽前西南急流为华南一带提供了充足水汽, 广西中南部出现中到大雨。28—29 日, 中高纬冷涡东移入海, 低纬度地区受波能量影响有高原短波槽与南支槽合并东移至 105°E (图 3g—3h), 冷暖空气在广西东南部交汇, 配合槽前正涡度平流的抬升作用造成部

分地区出现大暴雨。

综上所述, 第一阶段中北支 Rossby 波列调控了乌拉尔高压脊的发展以及横槽转竖, 起到主导作用。而南支波列调控了印缅槽的减弱, 使得低纬地区暖湿气流输送减弱, 冷空气更易南下。第二阶段南支 Rossby 波列起到了主要的调控作用, 其促进了南支槽的发展东移。南支槽前的正涡度平流以及西南急流分别为此阶段降水提供了动力抬升以及水汽条件。

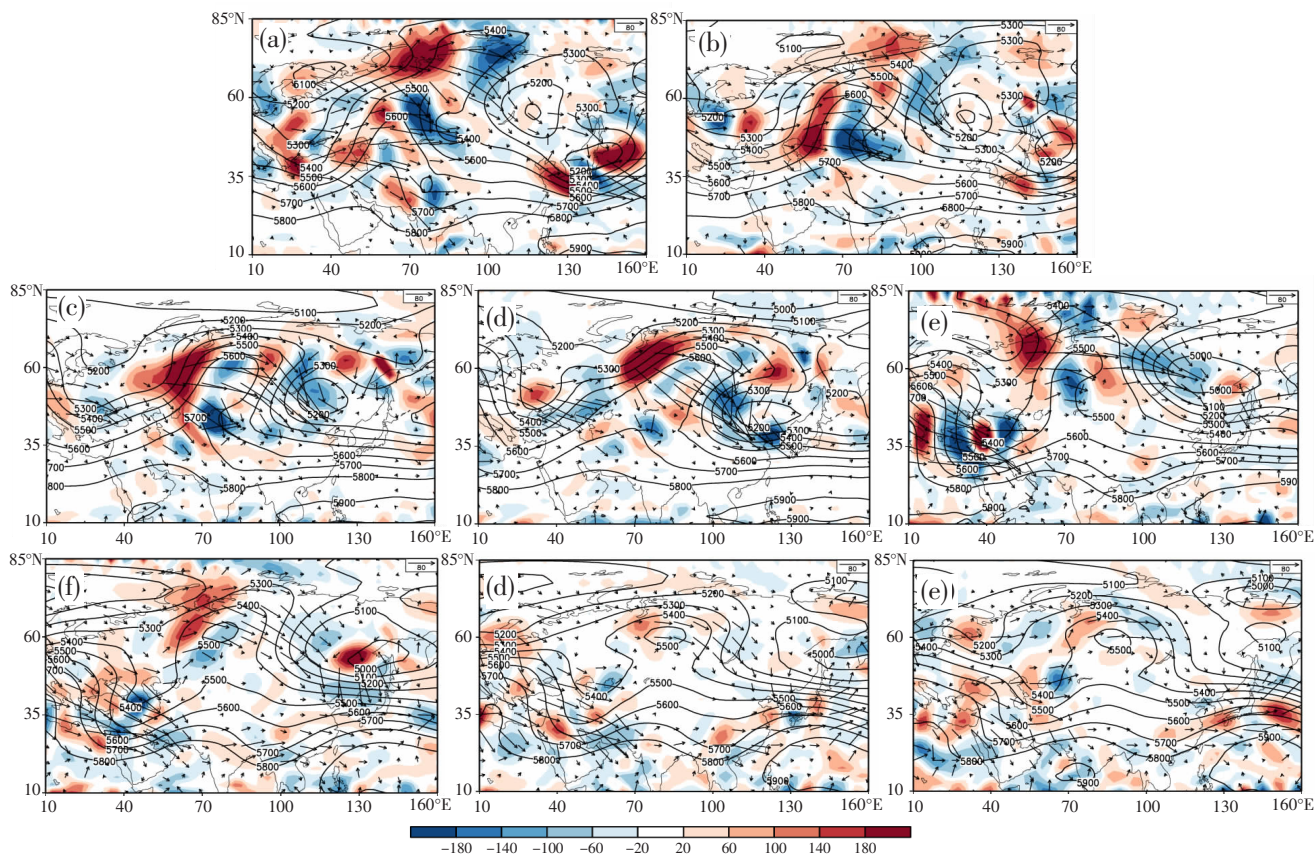


图 3 2016 年 1 月 19 日—22 日(a—d), 26 日—29 日(e—h)500hPa 位势高度(等值线, 单位: gpm), 波作用通量(箭头, 单位: $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$)及其散度(填色)

3.3 Rossby 波活动差异的可能原因

上述分析可知, 北支和南支 Rossby 波列分别在第一阶段和第二阶段中起到主要的调控作用。第一阶段中北支波列向东传播至东亚沿岸, 而南支波列只能到达印度半岛一带, 但是在第二阶段中后者却能东传至我国东部沿岸, 这种差异的原因或许可以由上游波源区的环流异常解释。

北大西洋地区常为北半球冬季 Rossby 波活动源区^[16,17], 有研究表明, NAO 与该波源的活动密切相关^[18]。当 NAO 正位相时, 北大西洋至地中海一带激发的南支波列向东南方向的波作用通量增强^[17], 有

利于波列传播至高原南侧一带。李纵横等^[19]的研究也指出, 冬季 NAO 为负位相的年份中, 向极传播并发生反射的北支 Rossby 波列较强。然而较强的沿低纬度路径传播的 Rossby 波列多出现在 NAO 为正位相的年份, 该波列沿着副热带急流波导传播, 使得 NAO 的影响可以东传至东亚地区。在此次过程中, 从 1 月 7 日开始 NAO 均维持负位相, 而在 1 月 23 日则转为正位相, 这种位相的转变反映了大气环流异常的反转。进一步分析波作用通量, 发现南支 Rossby 波能量在 1 月 23 日开始增强, 上游地区地中海一带存在较强的波作用通量。25 日波能量东传

至了孟加拉湾一带,南支槽较前期有明显的增强,槽区内波作用通量辐合。可见,这种南、北支波列强度变化与 NAO 位相转变的对应关系与前人研究得出的结论相符。因此,NAO 由负到正的位相转变可能是造成第二阶段南支 Rossby 波列增强的原因。

4 结论

通过分析得出以下结论:

(1) 冷空气活动过程前后两个阶段中大气环流存在明显差异。第一阶段中欧亚中高纬地区环流经向度大,阻塞形势明显,而低纬度地区环流平直,造成该阶段雨雪较少,以降温为主。第二阶段中欧亚低纬地区环流经向度增大,南支槽发展活跃,冷暖空气在广西交汇造成明显降水。

(2) 两个阶段中欧亚大陆上空均存在南北两支 Rossby 波列。第一阶段中北支 Rossby 波列调控了乌拉尔高压脊的发展以及横槽转竖,起到主导作用。而南支波列调控了印缅槽的减弱,使得低纬地区暖湿气流输送减弱,南北两支波列协同使得冷空气更易南下。第二阶段南支 Rossby 波列起到了主要的调控作用,其促进了南支槽的发展东移,为此阶段降水提供了动力抬升以及水汽条件。

(3) NAO 与南北两支 Rossby 波列的活动密切相关,NAO 由负到正的位相转变可能是造成第二阶段南支 Rossby 波列增强的原因。

参考文献:

- [1] Yeh T C. On energy dispersion in the atmosphere[J]. *J Meteor*, 1949(6): 1-16.
- [2] 黄荣辉,皇甫静亮,刘永,等.从 Rossby 波能量频散理论到准定常行星波动力学研究的发展[J]. *大气科学*, 2016, 40(1): 3-21.
- [3] 彭艳,王钊,刘安麟,等.2008 年 1 月中国南部低温雨雪冰冻天气特征及其与东亚大气环流异常探讨[J]. *大气科学学报*, 2010, 33(5): 634-640.
- [4] 李慧,陆尔,翟盘茂,等. Rossby 波和热带对流活动对 2010 年 6 月梅雨发生前后我国东部两次强降水过程的影响[J]. *大气科学学报*, 2019, 42(6): 26-36.
- [5] 杨宁,金荣花,肖天贵,等.夏季沿亚洲副热带西风急流 Rossby 波传播及其与我国降水异常的联系[J]. *气象*, 2020, 46(1): 1-14.
- [6] 陶诗言,卫捷.再论夏季西太平洋副热带高压的西伸北跳[J]. *应用气象学报*, 2006, 17(5): 513-525.
- [7] 陶诗言,卫捷,梁丰,等. Rossby 波的下游效应引发我国高影响天气的分析[J]. *气象*, 2010, 37(7): 85-97.

- [8] 陈海山,刘蕾,朱月佳.中国冬季极端低温事件与天气尺度瞬变波的可能联系[J]. *中国科学:地球科学*, 2012, 42(12): 1951-1965.
- [9] 江琪,马学款,王飞.2016 年 1 月大气环流和天气分析[J]. *气象*, 2016, 42(4): 514-520.
- [10] 李向红,陆虹,伍静,等.影响广西两次低温灾害及物理机制对比分析[J]. *灾害学*, 2018, 33(4): 60-64.
- [11] Takaya K, Nakamura H. A formulation of a Phase-independent Wave-activity Flux for Stationary and Migratory quasi-geostrophic Eddies on a Zonally Varying Basic Flow[J]. *J Atmos Sci*, 2001, 58(6): 608-627.
- [12] Andrews D G, McIntyre M E. Generalized Eliassen-Palm and Charney-Drazin Theorems for Waves on Axisymmetric Mean Flows in Compressible Atmospheres[J]. *J Atmos Sci*, 1978, 35(2): 175-185.
- [13] Plumb R A. On the Three-dimensional Propagation of Stationary Waves[J]. *J Atmos Sci*, 1985, 42(3): 217-229.
- [14] 施春华,金鑫,刘仁强.大气动力学中三种 Rossby 波作用通量的特征差异和适用性比较[J]. *大气科学学报*, 2017, 40(6): 850-855.
- [15] 施春华,蔡雯映,金鑫.强厄尔尼诺事件下 2016 年 1 月中国南方超级寒潮的动力学机制:瞬变波对大气长波异常的调制[J]. *大气科学学报*, 2016, 39(6): 827-834.
- [16] Kodera K, Mukougawa H, Fujii A. Influence of the Vertical and Zonal Propagation of Stratospheric Planetary Waves on Tropospheric Blockings[J]. *J Geophys Res: Atmos*, 2013, 118(15): 8333-8345.
- [17] 施春华,孙伟佳,郭栋. WP 和 NAO 对中国东南部冬季温度的协同影响[J]. *大气科学学报*, 2021, 44(3): 394-404.
- [18] Li J P, Zheng F, Sun C, et al. Pathways of Influence of the Northern Hemisphere Mid-high Latitudes on East Asian Climate: A Review[J]. *Adv Atmos Sci*, 2019, 36(9): 902-921.
- [19] 李纵横,宋洁,殷明,等.冬季与北大西洋涛动相关 Rossby 波列传播特征及对下游气候的影响[J]. *气候与环境研究*, 2019, 24(3): 289-301.
- [20] Huang R H. Wave Action Conservation Equation for Planetary Wave in a Spherical Atmosphere and Wave Guides of Stationary Planetary Wave Propagations Shown by Propagations Shown by Wave Action Flux[J]. *Science in China*, 1984, 27: 137-146.
- [21] Chen W, Yang S, Huang R H. Relationship between Stationary Planetary Wave Activity and the East Asian Winter Monsoon[J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2005, 110(D14110): 1-12.
- [22] 黄荣辉,魏科,陈际龙,等.东亚 2005 年和 2006 年冬季风异常及其与准定常行星波活动的关系[J]. *大气科学*, 2007, 31(6): 1033-1048.

Comparative analysis of Rossby wave before and after a cold air process in Guangxi

Qin Hao

(Guangxi Meteorological Observatory, Nanning 530022, China)

Abstract: The large-scale circulation and modulation of Rossby during two periods of a strong cold air process were comparative analyzed based on the T–N wave activity flux diagnosis by using ERA5 reanalysis data. The results showed that (1) there were significant differences in atmospheric circulation before and after this process. In the first stage, the blocking situation in the middle and high latitudes Eurasia was obvious while the patten in the low latitudes was straight. In the second stage, the circulation patten trended to more meridian in the low latitudes Eurasia and the southern branch trough (SBT) developed actively. (2) There were two Rossby wave trains located in the north and south Eurasia respectively during the two stages. The northern one regulated the development of the Ural ridge and the rotation of the transverse trough. The southern one modulated the weakening of the India–Burma trough. The synergy of the two Rossby wave trains made cold air reach the south easily in the first stage. The southern one dominated the development and eastward of the SBT, providing dynamic uplift and water vapor for precipitation in the second stage. (3) The NAO had a close relationship with the two wave trains. The phase transition of NAO from negative to positive is the possible reason for the strengthening of the southern one in the second stage.

Key words: Rossby wave; cold air; wave activity flux; circulation