

覃皓,伍丽泉,石怡宁,等,2023. 能量转化视角下一次引发冬季区域强对流的南支槽研究[J]. 气象,49(3):304-317. Qin H, Wu L Q, Shi Y N, et al, 2023. Study on the southern branch trough inducing a winter regional severe convection from the perspective of energy conversion[J]. Meteor Mon, 49(3):304-317(in Chinese).

能量转化视角下一次引发冬季区域强对流的南支槽研究^{*}

覃 皓¹ 伍丽泉^{2,3} 石怡宁^{4,5} 刘 乐¹

1 广西壮族自治区气象台, 南宁 530022

2 广西壮族自治区气象灾害防御技术中心, 南宁 530022

3 广西壮族自治区气候中心, 南宁 530022

4 中国气象局地球系统数值预报中心, 北京 100081

5 中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室, 北京 100081

提 要: 2020 年 1 月 24—25 日广西出现一次罕见区域性强对流, 过程伴随近 20 年最大范围冰雹天气。南支槽异常发展东移是此次过程的扰动背景, 提供了必要的热动力及水汽条件。基于波作用通量及多尺度能量诊断方法, 利用常规观测资料、风云卫星资料、NCEP/NCAR 以及 ERA5 再分析资料, 从能量转化角度对此次引发区域强对流的南支槽过程进行研究。结果表明: 整个过程中纬度和副热带西风急流均较历史同期偏强, 有利于上游扰动向下游传播。欧亚大陆上空存在南北两支活跃 Rossby 波列。源自地中海一带的南支副热带西风急流 Rossby 波列对南支槽起到主要调控作用, Rossby 波能量沿急流频散并在南支槽区辐合, 促进了南支槽发展东移。源自北大西洋阻塞高压内部的北支 Rossby 波列则起到协同作用, 促进了乌拉尔山冷槽发展及其与中东槽合并, 从而增强了南支波列向下游的传播, 进一步增强南支槽; 天气尺度有效位能向天气尺度动能的转换以及由背景场向天气尺度的动能输送是南支槽天气尺度扰动发展的主要贡献项。动能的平流输送将获得的天气尺度动能再分配, 维持南支槽稳定发展东移。在此背景下, 天气尺度向对流尺度的降尺度动能串级是区域强对流最主要能量源, 同时对流尺度有效位能向动能的稳定转换促进了中低对流层的对流扰动发生发展。

关键词: 能量转换, 南支槽, 区域强对流, Rossby 波, 波作用通量

中图分类号: P458

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2022.080102

Study on the Southern Branch Trough Inducing a Winter Regional Severe Convection from the Perspective of Energy Conversion

QIN Hao¹ WU Liqun^{2,3} SHI Yining^{4,5} LIU Le¹

1 Guangxi Meteorological Observatory, Nanning 530022

2 Guangxi Meteorological Disaster Prevention Technology Center, Nanning 530022

3 Guangxi Climate Center, Nanning 530022

4 Center for Earth System Modeling and Prediction of CMA, Beijing 100081

5 State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081

Abstract: A rare regional severe convection process of Guangxi occurred in 24—25 January 2020, which was accompanied by the maximal range hail process since 2000. The abnormal development and eastward

^{*} 广西重点研发计划(桂科 AB21075008)、广西气象科研计划项目(桂气科 2022QN08、桂气科 2021QN03)和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共同资助

2022 年 2 月 25 日收稿; 2022 年 8 月 1 日收修定稿

第一作者: 覃皓, 主要从事灾害性天气诊断及预报研究. E-mail: 289055112@qq.com

of the southern branch trough (SBT) were the disturbance backgrounds that provided necessary thermal, dynamic and water vapor conditions. Based on conventional observation data, FY-2G satellite data, NCEP/NCAR and ERA5 reanalysis data, the SBT inducing the regional severe convection process is analyzed from the perspective of energy conversion. The results show that the mid-latitude and subtropical westerly jets were stronger than those in the same period in history during the whole process, which were conducive to the upstream disturbance spreading. There were two active Rossby wave trains over the northern and southern Eurasia respectively. The southern subtropical westerly jet Rossby wave originated from the Mediterranean Sea played a major role in regulating the SBT. The Rossby wave energy dispersed along the jet stream and converged in SBT region, promoting the development and eastward of SBT. The northern one originated from the North Atlantic blocking played a synergistic role, promoting the development of the Urals cold trough and its merger with the Middle East trough, thereby enhancing the propagation of the southern one and further enhancing the SBT. The conversion from synoptic-scale available potential energy and the transport of kinetic energy from background field to synoptic-scale were the main contributions of synoptic-scale disturbance of SBT. The advection transport of kinetic energy redistributed the obtained synoptic-scale kinetic energy in space and thus maintained the stable development of SBT and moving eastward. Under the above background, the downscaled kinetic energy cascade from synoptic-scale to convective scale became the main energy source of regional severe convective, and the stable conversion of convective scale available potential energy to kinetic energy promoted the occurrence and development of the convective disturbances in the middle and low troposphere.

Key words: energy conversion, southern branch trough (SBT), regional severe convection, Rossby wave, wave activity flux

引 言

强对流具有局地性强、持续时间短、致灾性大等特点。强对流天气大范围成片出现,不仅会增加预报预警服务的难度,也给应急防灾工作带来巨大挑战,因此区域强对流的成因分析一直是学界关注热点。广西位于低纬度沿海地区,高温高湿的气候特征为强对流的发生提供了必要条件。多年来许多研究从云图、雷达特征以及环流分型等方面对广西区域性强对流进行了分析总结,得出具有参考意义的预报指标。然而在众多研究中,对于大气内部波动以及扰动能量传播的关注较少。

20 世纪 40 年代,Yeh(1949)提出了 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。此后该理论在天气预报中得到广泛应用,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(黄荣辉等,2016)。近年来极端天气事件日益频发,大气内

部波动在其中扮演着重要角色。李峰等(2006)研究了 2003 年梅汛期江淮地区的罕见特大洪涝灾害,指出西风基本气流及长波系统结构变化激发了经向传播的 Rossby 波,调控了副热带高压(以下简称副高)的南北进退,进而决定了雨带的移动。陶诗言和卫捷(2006)通过对比 1998、2003 和 2005 年夏季中国东部雨带变化发现纬向传播的 Rossby 波同样调控了副高的移动,并指出里海上空的高压脊发展会激发静止 Rossby 波,其波动能量随高空急流波导向下游频散,促进中国沿海一带长波脊发展,进而影响副高。除此之外,中国极端低温事件也与上游 Rossby 波扰动的传播密切相关(马晓青等,2008;陈海山等,2012)。这种大气内部的动力过程,刻画了大气波动与极端天气事件间的内在联系。

在北半球冬季,北大西洋一带至欧亚大陆上空常有南北两支活跃的 Rossby 波列影响东亚地区(Wallace and Gutzler,1981;Li et al,2019)。以往关于北支 Rossby 波列对中国天气的影响研究较多,由于其路径偏北,对冷空气活动影响显著,因而许多研究工作聚焦于寒潮、低温雨雪事件(施春华

等,2016;张琳等,2020;李言蹊和陈海山,2021)。相较之下,关于南支 Rossby 波列的研究则较少。索渺清等(2008)指出从北非到孟加拉湾的南支波列是南支槽发展的重要因素之一。郑建萌等(2021)发现欧洲西部的高压脊发展可以激发 Rossby 波列,造成下游地区中高纬蒙古脊增强以及中低纬南支槽发展的“北脊南槽”形势。而南支槽的演变,与我国西南、华南地区的天气气候都密切相关(广西壮族自治区气象局气象台天气研究室,1977;索渺清和丁一汇,2009)。除此之外,广西地处南支 Rossby 波列的下游地区,且冬季南支副热带西风急流强盛,位于 $20^{\circ}\sim 30^{\circ}\text{N}$,正好覆盖广西上空。因此上游扰动容易在南支急流波导作用下向下游频散(Trenberth, 1986;索渺清等,2008;陈海山等,2012),调整欧亚地区的环流形势,进而对广西的天气气候产生影响。

2020 年 1 月 24—25 日,广西出现了当年首场区域性暴雨,较往年偏早。此次过程伴随大范围冰雹强对流天气,是 2000 年以来影响区域最广的一次。广西的冰雹天气主要出现在 2—5 月(占全年总日数的 90%以上),很少出现在 1 月,并且一次强对流过程出现 30 个站以上的冰雹观测记录的情况也极为罕见。研究表明此次过程与南支槽异常活跃有关(江琪等,2020),但南支波动频繁的原因并不明确,并且南支槽的活跃期一般在 3—5 月(索渺清和丁一汇,2009),因此有必要进一步分析。此外,以往广西区域强对流的研究大多从诊断动力和热力条件的角度出发,鲜有对于其中能量过程的讨论。然而能量场的变化与对流的发生发展存在密切联系(李超等,2017;孙思远和管兆勇,2021)。综上所述,本文将通过诊断波活动通量研究 Rossby 波在此次区

域性强对流过程中对环流背景的影响,并利用多尺度能量诊断方法分析其中的能量转换过程,加深对此类极端性天气事件的认识,提供预报着眼点参考。

1 资料和方法

1.1 资料

使用常规气象观测资料(包括广西全区 89 个国家站,2821 个区域站),风云二号 G 星的相当黑体温度(TBB)资料(分辨率为 $0.1^{\circ}\times 0.1^{\circ}$)。在大尺度环流形势分析中采用美国环境预报中心和国家大气环境研究中心(NCEP/NCAR)的逐月和逐日再分析资料(分辨率为 $2.5^{\circ}\times 2.5^{\circ}$)。逐小时尺度的分析中采用分辨率更高的欧洲中期天气预报中心 ERA5 再分析资料(分辨率为 $0.25^{\circ}\times 0.25^{\circ}$)。再分析资料包括位势高度、温度、比湿和水平风场等变量。文中均为北京时。

1.2 波活动诊断

利用 T-N(Takaya and Nakamura, 2001)波作用通量来诊断 Rossby 波的传播。T-N 波作用通量是 Plumb 波通量(Plumb, 1985)的进一步扩展,能够诊断波动随时间的演变特征,并且可以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,因而适用于纬向非对称波动较强的冬季对流层(施春华等,2017)。根据 Takaya and Nakamura (2001),水平方向上 T-N 波作用通量的表达式如下:

$$\mathbf{W} = \frac{p \cos \varphi}{2|\mathbf{U}|} \cdot \left\{ \begin{aligned} & \frac{U}{a^2 \cos^2 \varphi} \left[\left(\frac{\partial \psi'}{\partial \lambda} \right)^2 - \psi' \frac{\partial^2 \psi'}{\partial \lambda^2} \right] + \frac{V}{a^2 \cos \varphi} \left[\frac{\partial \psi'}{\partial \lambda} \frac{\partial \psi'}{\partial \varphi} - \psi' \frac{\partial^2 \psi'}{\partial \lambda \partial \varphi} \right] \\ & \frac{U}{a^2 \cos \varphi} \left[\frac{\partial \psi'}{\partial \lambda} \frac{\partial \psi'}{\partial \varphi} - \psi' \frac{\partial^2 \psi'}{\partial \lambda \partial \varphi} \right] + \frac{V}{a^2} \left[\left(\frac{\partial \psi'}{\partial \varphi} \right)^2 - \psi' \frac{\partial^2 \psi'}{\partial \varphi^2} \right] \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: $\psi' = \Phi' / f$ 为准地转流函数扰动, $f = 2\Omega \sin \varphi$, $\mathbf{U} = (U, V)$ 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。波作用通量的矢量大小表征波能量的频散强度,矢量方向与 Rossby 波能量的传播方向一致。波作用通量的散度为正(负),表征扰动减弱(增强)。此外,气候背景场选取多年平均的当月气候场,能更好地反映当前季节内 Rossby 波传播异常(施春华等,2017)。

1.3 多尺度子空间变换及局地多尺度能量分析

在讨论能量传输过程时,采用以多尺度子空间变换(MWT)为框架的局地多尺度能量涡度分析(Liang and Anderson, 2007; Liang, 2016)。

MWT 可以在保证能量守恒的前提下通过泛函分析将函数空间分解为不同尺度的子空间,同时保持物理过程的局地性。利用该方法将讨论的物理量

场划分为三个尺度的子空间:①反映大气低频变化的 256 h 以上的背景场子空间;②32~256 h 天气尺度扰动子空间;③32 h 以下对流扰动的高频尺度子空间。

基于上述框架,Liang(2016)给出了局地多尺度动能收支方程:

$$\frac{\partial K_{\tilde{\omega}}}{\partial t} = -\nabla \cdot \mathbf{Q}_{\tilde{K}}^{\tilde{\omega}} - \nabla \cdot \mathbf{Q}_{\tilde{P}}^{\tilde{\omega}} - b^{\tilde{\omega}} + \Gamma_{\tilde{K}}^{\tilde{\omega}} + F_{\tilde{K}}^{\tilde{\omega}} \quad (2)$$

式中:等号左侧项为局地动能变率,右侧各项名称及表达式如表 1 所示。

表 1 中未列入的 $F_{\tilde{K}}^{\tilde{\omega}}$ 表征子空间 $\tilde{\omega}$ 中动能的摩

擦耗散。这里 $\mathbf{v}=(u,v,\omega), \mathbf{v}_h=(u,v), \alpha=RT/p, R$ 为摩尔气体常数, $\hat{x}^{-\tilde{\omega}}$ 表示对某一变量 x 在子空间 $\tilde{\omega}$ 上的 MWT 变换, $\tilde{\omega}=0, 1$ 和 2 分别代表背景场子空间、天气尺度子空间以及对流尺度子空间,因而 $\Gamma_{\tilde{K}}^{0 \rightarrow 1}$ 和 $\Gamma_{\tilde{K}}^{1 \rightarrow 2}$ 分别代表背景场子空间向天气尺度子空间、天气尺度子空间向对流尺度子空间的动能跨尺度输送(正值为输送,负值为反馈)。该方法已在大气多尺度动力学能量分析中广泛应用,如阻塞高压(李刚等,2020)、风暴轴(Zhao and Liang, 2019)等。

表 1 子空间 $\tilde{\omega}$ 中局地动能各收支项的物理意义

Table 1 Symbols for the energetic terms in window $\tilde{\omega}$

符号	名称	表达式
$-\nabla \cdot \mathbf{Q}_{\tilde{K}}^{\tilde{\omega}}$	动能平流输送	$-\frac{1}{2} \nabla \cdot [(\mathbf{v}_h)^{-\tilde{\omega}} \cdot \mathbf{v}_h^{-\tilde{\omega}}]$
$-\nabla \cdot \mathbf{Q}_{\tilde{P}}^{\tilde{\omega}}$	位势通量散度 (气压梯度力做功)	$-\nabla \cdot [\hat{\mathbf{v}}^{-\tilde{\omega}} \hat{\Phi}^{-\tilde{\omega}}]$
$-b^{\tilde{\omega}}$	浮力转换 (动能和有效位能的相互转换)	$-\hat{\omega}^{-\tilde{\omega}} \hat{\alpha}^{-\tilde{\omega}}$
$\Gamma_{\tilde{K}}^{\tilde{\omega}}$	动能跨尺度输送	$-\frac{1}{2} \{ (\hat{\mathbf{v}} u)^{-\tilde{\omega}} \cdot \nabla \hat{u}^{-\tilde{\omega}} - [\nabla \cdot (\hat{\mathbf{v}} u)^{-\tilde{\omega}}] \hat{u}^{-\tilde{\omega}} \} +$ $\frac{1}{2} \{ (\hat{\mathbf{v}} v)^{-\tilde{\omega}} \cdot \nabla \hat{v}^{-\tilde{\omega}} - [\nabla \cdot (\hat{\mathbf{v}} v)^{-\tilde{\omega}}] \hat{v}^{-\tilde{\omega}} \}$

2 过程概况及环流形势

2.1 过程概况

受南支槽发展东移和冷空气渗透南下影响,2020 年 1 月 24—25 日广西出现一次区域性强对流

天气。过程产生西南东北向两支雨带(图 1a),全区 89 个国家气象站中有 12 个站降水量达到暴雨以上,其中 2 个站达大暴雨,最大雨量为 114.2 mm,区域站最大为 124.4 mm。此次天气过程造成了大范围降雹(图 1b),1 月 24 日为锋前暖区以及锋面对流,25 日为冷锋后的高架对流,相较而言前一阶段对流天气更为剧烈。

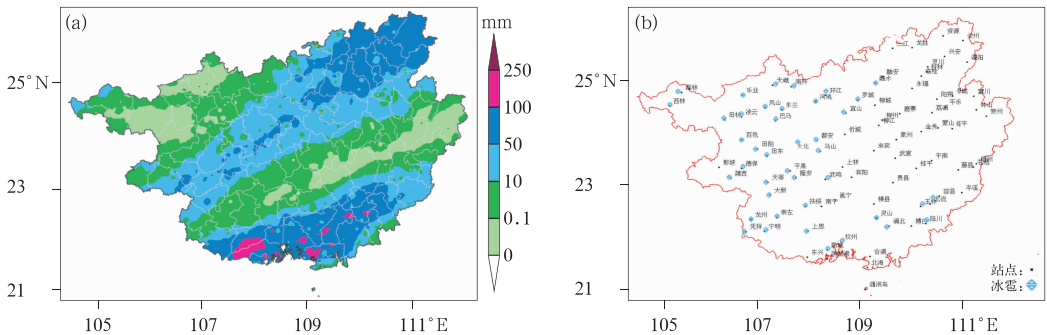


图 1 2020 年 1 月 24—25 日广西(a)过程累计雨量和(b)冰雹落区分布
Fig. 1 Distribution of (a) accumulated precipitation and (b) hail area in Guangxi in 24—25 January 2020

2.2 中尺度特征云团演变

24 日 12—13 时,南支槽位于 100°E 附近,在槽前中南半岛北部越南境内,低层的偏南风与喇叭口地形呈约 45° 夹角,由于地形的摩擦以及抬升触发,已经有一孤立对流云团在发展,TBB 低于 -56°C (图 2a)。14—17 时该对流单体在槽前西南气流引导下东北移入境广西后不断发展,云团面积明显增大,造成桂南局地出现 $30\sim 40\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 的强降水及降雹,冰雹最大直径达到 30 mm。24 日 18—22 时,对流云团仍不断在越南北部触发后入境广西,具有较长生命史,造成其移动路径上桂南多地出现强对流。于此同时,冷锋缓慢南压,在广西中北部触发多个对流云团(图 2b)。25 日凌晨,对流呈减弱态势。25 日 06—16 时,冷空气已经南下入海,广西上空低对流层基本为偏北风(图 2c),但桂南地区出现了高架雷暴,对流云团呈东北西南向,与图 1a 中的降水落区形态相符。由于 24 日和 25 日的降水落区在桂南一带重叠,不断有对流云团经过,造成该区域累计降水强于桂北。18 时之后随着南支槽东移,广西上空云系减弱东移,过程趋于结束。

2.3 环流形势演变

21—22 日,500 hPa 上欧亚中高纬地区上游,北大西洋阻塞高压发展促使新地岛以西冷空气南下,乌拉尔山一带为冷涡控制。下游贝加尔湖北侧冷涡向西南延伸一冷温槽,引导槽后冷空气侵袭中国北

方。低纬地区环流较为平直,副高控制中南半岛至西北太平洋一带,中东至高原西南侧存在温度负距平(图 3a)。23—24 日,随着南北冷空气合并,乌拉尔山至红海一带发展为宽广的冷槽,环流倾向度增大,在其下游的南支槽也逐渐发展并东移至 100°E 附近,位势高度降至 $5600\sim 5700\text{ gpm}$,较历年同期偏强约 80 gpm(图 3b),槽前有暖区对流触发(图 2a)。此外,南支槽携带冷空气,广西上空中层温度距平为 $-6\sim -4^{\circ}\text{C}$,有利于增大温度直减率,增强层结不稳定性。25 日南支槽达到最强,位势高度距平达到 -100 gpm 。26 日广西上空转为槽后,过程结束。

低层 850 hPa 华南一带在 22 日之前均受偏南暖湿气流控制,地表增温 $1\sim 5^{\circ}\text{C}$,同时高原东部有冷空气向南渗透扩散(图 3c)。23—24 日(图 3d),南支槽发展东移引导低层切变及冷空气主体逐渐南压至广西北部,伴随地面 $-5\sim -1^{\circ}\text{C}$ 的过程降温。桂南一带 850 hPa 与 500 hPa 温差达到 24°C ,对流层低层不稳定能量积聚。25 日冷锋南压至广西沿海,全区低层受冷空气控制,过程由暖区以及锋面对流转为锋后高架雷暴。

2.4 水汽输送

24—25 日,西太平洋和南支槽前各存在一支水汽输送带,两支水汽环流在南海汇合转向北输送,在广西一带辐合,为降水及区域强对流发生发展提供有利条件(图 4)。

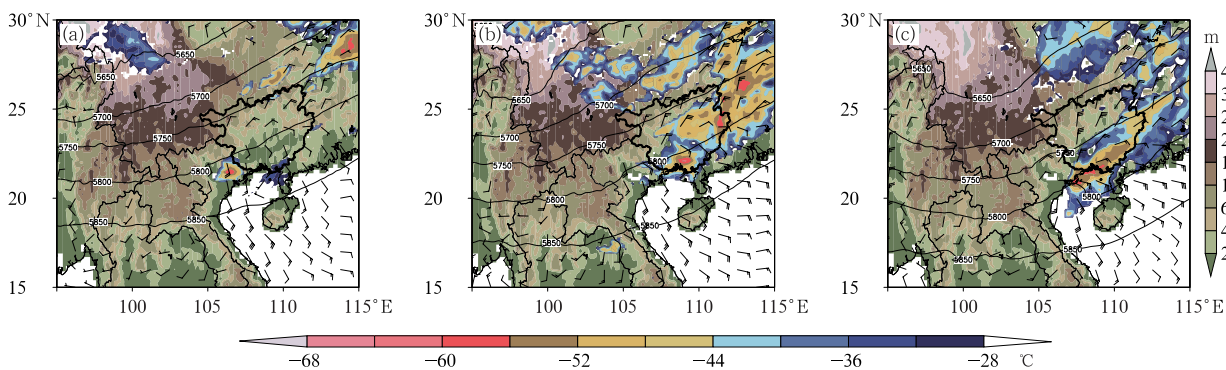


图 2 2020 年 1 月(a)24 日 13 时,(b)24 日 22 时,(c)25 日 12 时的 TBB(填色,只显示 $\text{TBB} \leq -28^{\circ}\text{C}$)和 500 hPa 位势高度(等值线,单位: gpm)以及 925 hPa 风场(风羽)分布
(绿棕填色为地形高度)

Fig. 2 Distribution of TBB (colored, only $\text{TBB} \leq -28^{\circ}\text{C}$), 500 hPa geopotential height (contour, unit: gpm) and 925 hPa wind field (barb) at (a) 13:00 BT 24, (b) 22:00 BT 24, and (c) 12:00 BT 25 January 2020
(Green and brown shaded areas are for terrain height)

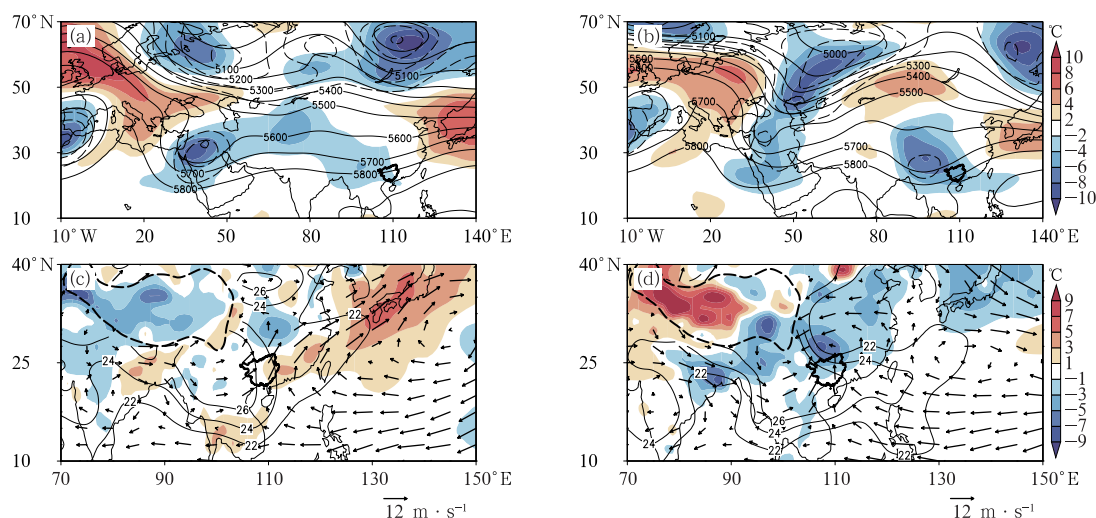


图3 2020年1月(a,c)22日,(b,d)24日的(a,b)500 hPa位势高度(实线,单位:gpm)及其距平(虚线,单位:gpm,只显示小于-20 gpm),温度距平(填色),(c,d)850 hPa风场(风矢),地表2 m的24 h变温(填色)以及850 hPa与500 hPa温差(等值线,单位:℃,虚线为3 km高度地形边界)

Fig. 3 Distribution of (a, b) 500 hPa geopotential height (solid line, unit: gpm) and its anomalies (dashed line, unit: gpm, only the values smaller than -20 gpm), temperature anomalies (colored); (c, d) 850 hPa wind field (wind vector), 24 h temperature change of 2 m height (colored) and $T_{850-500}$ (contour, unit: °C; dashed line: 3 km topographic boundary) on (a, c) 22 and (b, d) 24 January 2020

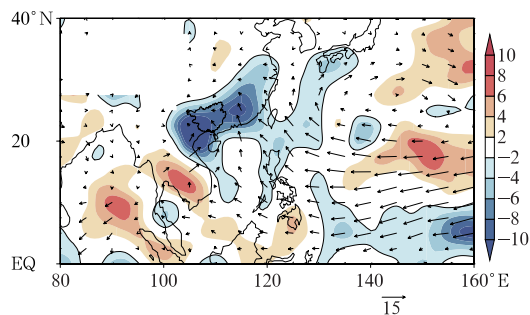


图4 2020年1月25日850 hPa水汽通量

(箭头,单位: $\text{g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)及其散度(填色,单位: $10^{-8} \text{g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)

Fig. 4 Distribution of water vapor flux (arrow, unit: $\text{g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$) and its divergence (colored, unit: $10^{-8} \text{g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$) at 850 hPa on 25 January 2020

3 Rossby波活动对南支槽的影响分析

上述分析表明,23—25日南支槽的异常发展及

东移为本次过程提供了必要的热动力以及水汽条件。而南支槽的异常增强,又与上游环流系统异常演变导致的 Rossby 波传播密切相关(索渺清等, 2008; Li and Sun, 2015)。以下通过诊断波作用通量,研究过程中 Rossby 波对南支槽的影响。

3.1 西风急流波导与 Rossby 波能量频散

大气 Rossby 波总是向波折射指数极大值区传播,而急流常对应于波折射指数极大值区,因此急流可作为大气 Rossby 波波导,将 Rossby 波能量向下游频散(Hoskins and Ambrizzi, 1993)。由南支槽明显增强时段(1月23—26日)的500 hPa风速分布可见,欧亚大陆上空存在两支西风急流,南北两支急流在高原西侧分别向南向北分流后在亚洲东岸汇合,两支急流均较历史同期偏强(图5a)。相比较而言,南支副热带西风急流更为强盛,急流带更宽广,更有利于上游波动向下游传播(Li and Sun, 2015),沿着南支急流路径位势高度异常呈“正—负—正—负—正”的 Rossby 波列特征。有研究表明,沿南支急流传播的 Rossby 波列与影响中国南方冬季降水

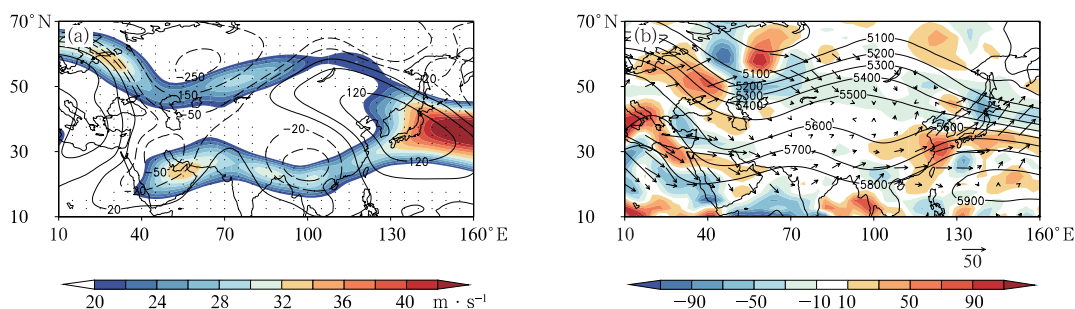


图 5 2020 年 1 月 23—26 日平均的 500 hPa(a)位势高度距平(等值线,单位:gpm)

和风速(填色,打点区域风速大于气候平均),(b)位势高度(等值线,单位:gpm)

和波作用通量(箭头,单位: $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$)及其散度(填色,单位: $10^{-6} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$)

Fig. 5 Distribution of averaged 500 hPa (a) geopotential height anomalies (contour, unit: gpm) and wind speed (colored, dotted area; larger than the climatological), (b) geopotential height (contour, unit: gpm), wave-activity fluxes (arrow, unit: $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$) and its divergence (colored, unit: $10^{-6} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$) from 23 to 26 January 2020

的关键环流系统密切相关(Li et al, 2020; 陈婉玲和李秀珍, 2022)。为进一步讨论急流引导下 Rossby 波能量频散对下游的影响, 计算南支槽发展阶段的 T-N 波作用通量及其散度。结果如图 5b 所示, 可以看到在欧亚大陆上空存在南北两支活跃的 Rossby 波列, 两者波源均位于北大西洋高压脊区, 该区域常为北半球冬季 Rossby 波活动源区(Kodera et al, 2013; 施春华等, 2016)。北支波列起源于西欧一带, 该区域为波作用通量辐散, 波列表现为沿大圆路径传播, 途径乌拉尔山、贝加尔湖至中国华北, 调控了中高纬的乌拉尔山冷槽以及贝加尔湖一带的蒙古高压脊。南支波列起源于地中海一带, 沿副热带西风急流向东南方向传播, 途经中东、阿拉伯海、孟加拉湾、高原东南侧至亚洲东岸, 调控了中低纬的中东槽、阿拉伯脊以及南支槽。可以看到在南支槽上存在波作用通量的辐合, 表明波能量在此汇聚, 有利于南支槽的加深, 负距平增大。

3.2 波作用通量的逐日演变及其影响

图 6 反映了整个过程中波能量的传播特征, 下文进一步讨论波动随时间的演变情况, 考察 Rossby 活动对此次过程环流背景的影响。

21—22 日, 欧亚大陆低纬地区环流较为平直, 受来源于地中海一带的波作用通量影响, 中东槽逐渐发展加深。中高纬度地区上游, 波作用通量由北大西洋阻高指向乌拉尔山一带, 促进该地区冷槽逐渐发展(图 6a, 6b)。23 日乌拉尔山冷槽的位势高度

负距平达到最大值, 并与南侧的中东槽同位相叠加(图 6c), 此时中东槽也发展至最强, 并向下游输出能量, 使得低纬地区槽脊得到发展, 环流经向度增大。由图 6c 还可以看到南支槽上波作用通量明显增强, 位势高度负距平逐渐加深, 达到 $-100 \sim -60$ gpm, 从中东至高原南侧呈“负—正—负”的位势高度距平分布。此时南支槽在经向上横跨约 20 个纬距。受南支槽前西南气流的影响, 我国江南一带的部分地区出现了大雨或大暴雨。24 日, 乌拉尔山至中东地区冷空气合并(图 3b), 进一步增强了向下游南支槽区频散的 Rossby 波能量, 南支槽发展东移至 100°E 附近(图 6d), 开始影响贵州、广西一带。25—26 日, 地中海高压脊逐渐东移至中东地区, 中低纬欧亚大陆为大范围位势高度负异常所控制(图 6e, 6f)。与此同时, 乌拉尔山冷槽不断向下游频散能量, 促进了贝加尔湖一带高压脊的发展, 从而使得冷空气不断补充南下, 黄淮、江淮等地出现雪或雨夹雪, 而冷暖空气交汇的南方地区出现持续性降水。

由南支槽区区域平均($20^\circ \sim 30^\circ\text{N}$, $85^\circ \sim 110^\circ\text{E}$)的波作用通量散度及位势高度时间序列(图 7)可以更为直观体现此次过程波作用通量对南支槽的影响。可以看到, 伴随着 1 月 23—26 日槽区内波作用通量辐合的增强, 位势高度有明显的降低过程, 由 5738 gpm 降低至 5696 gpm, 对应南支槽的增强。随后波作用通量转为辐散, 南支槽强度也随之减弱。

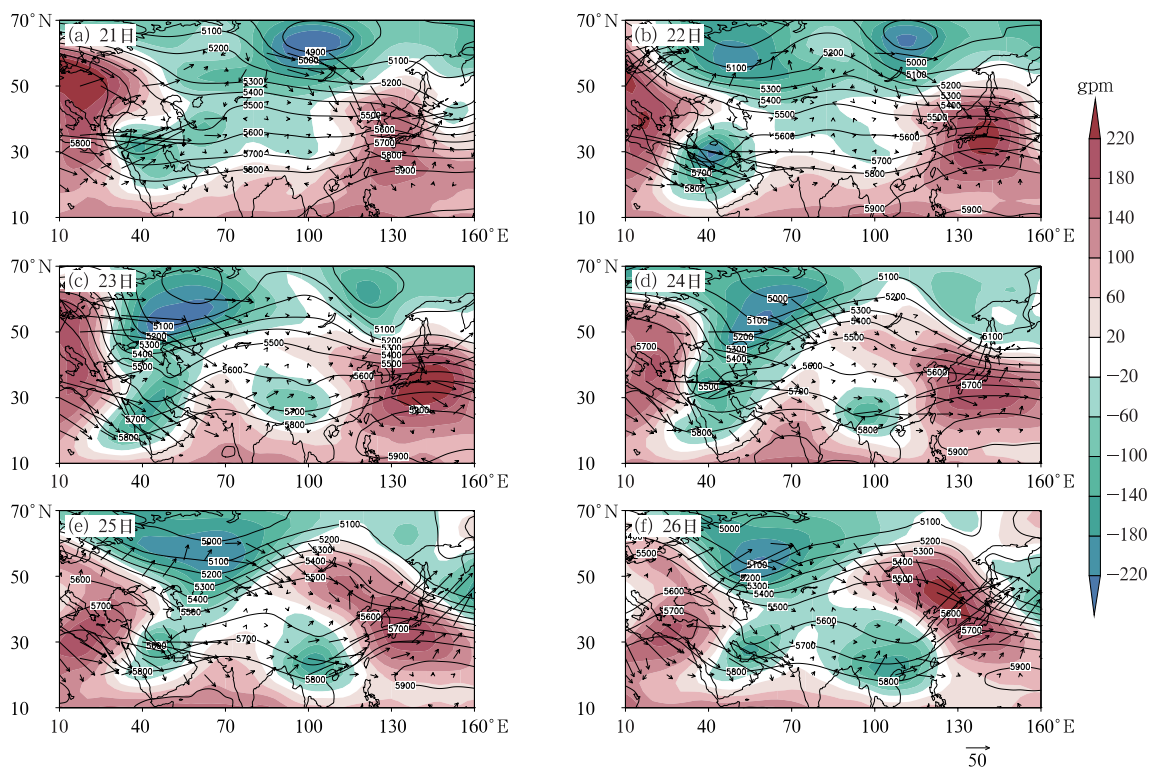


图6 2020年1月21—26日500 hPa位势高度(等值线,单位:gpm)及其扰动场(填色),波作用通量(箭头,单位: $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$)

Fig. 6 Distribution of 500 hPa geopotential height (contour, unit: gpm) and its anomalies (colored), wave-activity fluxes (arrow, unit: $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$) from 21 to 26 in January 2020

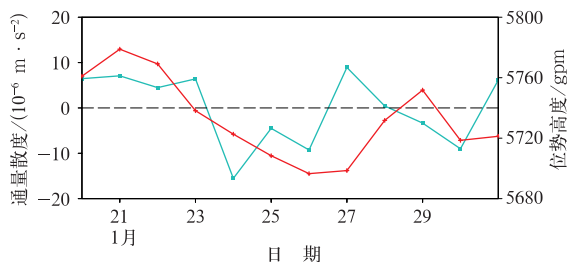


图7 2020年1月21—29日500 hPa上区域平均($20^\circ \sim 30^\circ \text{N}$, $85^\circ \sim 110^\circ \text{E}$)的波作用通量散度(蓝线)以及位势高度(红线)时间序列

Fig. 7 Time series of 500 hPa wave-activity fluxes divergence (blue line) and geopotential height (red contours) averaged over ($20^\circ \sim 30^\circ \text{N}$, $85^\circ \sim 110^\circ \text{E}$) from 21 to 29 January 2020

总体而言,源自地中海一带的南支 Rossby 波列对南支槽起到了主要的调控作用,促进了南支槽的发展东移。北支 Rossby 波列则起到了协同作用,其促进了乌拉尔山冷槽的发展以及与中东槽的合并,从而增强了南支波列向下游的传播,进一步增

强了南支槽。

4 多尺度能量转换

4.1 南支槽区能量收支

根据式(2)进一步讨论南支槽发展的能量收支情况,以下聚焦于南支槽发展增强的时段(1月24日平均)。相较而言,对流尺度向天气尺度的动能传输($\Gamma_K^{e \rightarrow 1}$)量级较小,这也与孙建华等(2018)的发现类似,单次过程中扰动场对背景场的反馈作用并不显著,因此这里没有给出。在天气尺度窗口下,南支槽区存在正的浮力转换项大值区,表明南支槽的发展伴随明显的天气尺度有效位能向天气尺度动能的转换(图8a)。在槽后以及槽前偏东一侧为动能跨尺度输送项($\Gamma_K^{0 \rightarrow 1}$)大值区,表明局地正压不稳定,存在背景尺度动能向天气尺度动能输送。而槽中心偏东一侧为负值区,表明局地正压稳定,存在天气尺度向背景尺度的动能反馈(图8b)。在动能的空间输

运方面,动能平流输送项在槽区内表现为东西方向正负相间分布,其中正值区与 Γ_K^{-1} 的负值区有一定的对应,表明由背景气流获得的动能的空间上得到再分配,弥补了局地动能的流失,进而维持了南支槽稳定发展东移(图 8c)。位势通量散度项在此阶段槽区中基本为负值(图 8d),表明气压梯度力做功是动能的汇。

由南支槽区 ($20^{\circ}\sim 30^{\circ}\text{N}$ 、 $85^{\circ}\sim 110^{\circ}\text{E}$) $700\sim 400$ hPa 积分的天气尺度子空间上各动能贡献项时间序列(图 9)也可以看出,1月24—25日南支槽的发展伴随有效位能向动能的转换,同时有明显的背景尺度向天气尺度的动能输送。动能的平流输送作用也有利于南支槽扰动能量的积累,而位势通量散度项对应的气压梯度力做功则消耗了部分天气尺度动能。

作为主要的贡献项之一,有效位能通过垂直方向上暖空气上升冷空气下沉完成向动能的转换(沙

莎等,2018)。2.3 节中已指出,1月24日南支槽携带冷空气东移,中层为明显的温度负距平(图 3b)。中层冷平流使得槽区 850 hPa 与 500 hPa 温差达到 26°C 以上(图 3d),这种不稳定层结的建立有利于垂直方向冷暖空气对流,促进了有效位能向动能转换。在跨尺度动能输送方面,背景环流水平切变的变化可以一定程度上解释背景尺度动能的降尺度输送(卢慧超等,2017)。由图 9 可以看到,在背景尺度向天气尺度输送动能之前,已有浮力转换为南支槽的发展供能。斜压能量转换促进了南支槽发展,在其逐渐增强的气旋式环流影响下,背景环流的气旋式切变也随之增强,因而使得背景尺度向天气尺度的动能输送开始增强。在 25 日 08 时之后,南支槽逐渐东移出 ($20^{\circ}\sim 30^{\circ}\text{N}$ 、 $85^{\circ}\sim 110^{\circ}\text{E}$) 区域,转为槽后的反气旋式环流影响,动能输送转为天气尺度向背景尺度反馈。

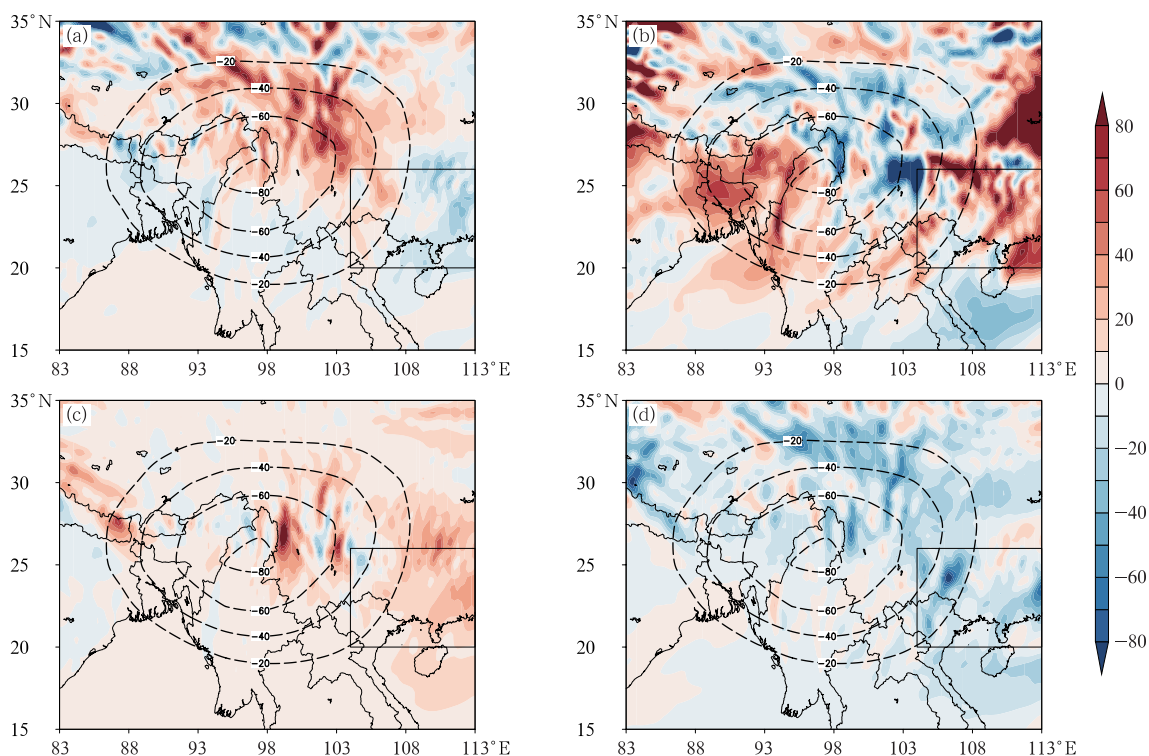


图 8 2020 年 1 月 24 日 00—23 时平均的 500 hPa 高度扰动场(等值线,单位:gpm)以及 $700\sim 400$ hPa 积分的天气尺度子空间上各动能贡献项(填色,单位: $10^{-4} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-3}$)
(a)浮力转换项,(b)动能跨尺度输送项,(c)动能平流输送项,(d)位势通量散度项
(矩形区域为 $20^{\circ}\sim 30^{\circ}\text{N}$ 、 $85^{\circ}\sim 110^{\circ}\text{E}$,下同)

Fig. 8 Geopotential height anomalies (contour, unit: gpm) and synoptic-scale energetic terms integrated from 700—400 hPa (colored, unit: $10^{-4} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-3}$) from 00:00 BT to 23:00 BT 24 January 2020

(a) $-b^1$, (b) Γ_K^{-1} , (c) $-\nabla \cdot Q_K^1$, (d) $-\nabla \cdot Q_P^1$
(rectangular area: $20^{\circ}\sim 30^{\circ}\text{N}$, $85^{\circ}\sim 110^{\circ}\text{E}$, the same below)

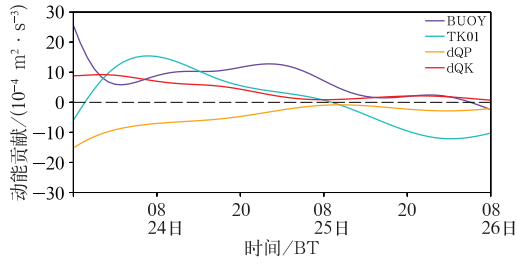


图9 2020年1月24—26日700~400 hPa积分的区域平均(20°~30°N, 85°~110°E)天气尺度子空间上各动能贡献项时间序列(BUOY、TK01、dQP和dQK分别为浮力转换项、动能跨尺度输送项、位势通量散度项和动能平流输送项,下同)

Fig. 9 The time series of synoptic-scale energetics terms averaged over (20°–30°N, 85°–110°E) integrated from 700–400 hPa from 24 to 26 January 2020 (BUOY, TK01, dQP and dQK indicate $-b^1$, $\Gamma_K^{0 \rightarrow 1}$, $-\nabla \cdot Q_p^1$ and $-\nabla \cdot Q_k$ terms respectively, the same below)

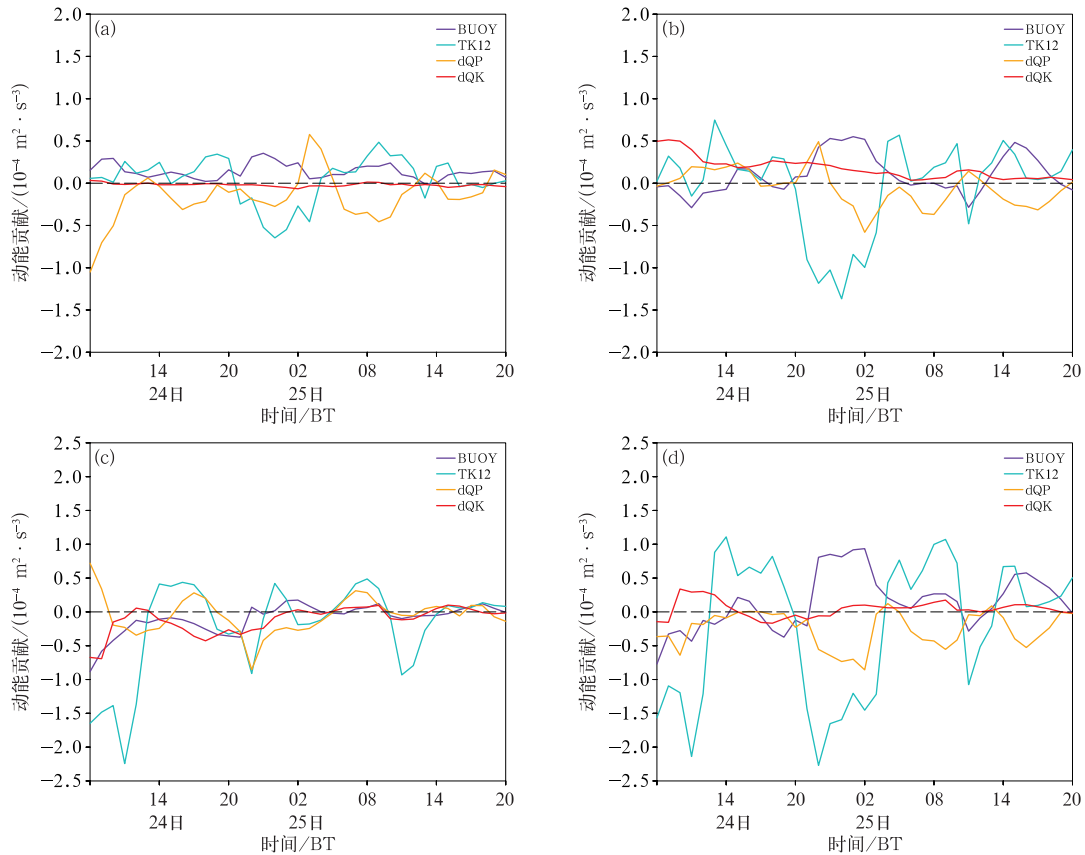


图10 2020年1月24—25日局地区域(20°~30°N, 85°~110°E)平均的对流尺度子空间上各动能贡献项时间序列
(a)1000~700 hPa, (b)700~400 hPa, (c)400~200 hPa, (d)1000~200 hPa

Fig. 10 The time series of locally-averaged convection-scale energetics terms integrated from (a) 1000–700 hPa, (b) 700–400 hPa, (c) 400–200 hPa, (d) 1000–200 hPa over (20°–30°N, 85°–110°E) from 24 to 25 January 2020

4.2 强对流区能量收支

南支槽的东移发展为本次区域强对流过程提供了背景扰动场,接下来分析在该天气尺度环流背景下对流能量的收支情况。计算强对流区域(20°~26°N, 104°~113°E, 图8中实线方框)范围内平均的各动能贡献项在不同高度上随时间的演变(图10)。在对流尺度窗口下,整个过程中对流层中低层浮力转换项为正(图10a),表明中低层有效位能向动能的转化是对流发生发展的稳定能量源。而在对流层中、高层(图10b, 10c),浮力转换的正贡献主要集中在25日凌晨以及午后时段。天气尺度的动能向对流尺度的动能传输($\Gamma_K^{1 \rightarrow 2}$)在对流层中、低层表现为白天的正贡献,而在夜间则转为对流尺度向天气尺度的动能反馈(图10a, 10b),因此导致24日夜间至25日凌晨强对流的减弱,此时能量来源主要为浮力转换项。在对流层高层(图10c),24日强对流开始

前后(12 时左右), Γ_k^{-2} 由负转正, 表明对流开始后跨尺度的动能输送促进了扰动进一步向高层发展, 而该输送在 25 日相对较弱, 这可能是造成 24 日对流更强、落地冰雹直径更大的原因之一。位势通量散度项在 24 日主要表现为低、高层的负贡献以及中层的正贡献, 表明在该时段位势通量输送将对流尺度动能重新分配并向中层输送。在 25 日, 位势通量散度项则为对流尺度动能的汇。整个过程中动能平流输送项在对流层低、高层为负值而在中层为正值, 起到将对流动能向中间层分配的作用。在整层积分情况下(图 10d), 区域强对流旺盛期间(冰雹观测记录主要集中于 24 日 13—22 时, 25 日 06—16 时)都存在显著的动能降尺度输送, 在该时段内正的贡献最大, 表明此次过程中降尺度动能级串是对流活动最主要的能量源。

急流的减弱断裂一定程度上是动能由天气尺度向对流尺度流失的表现(张弛等, 2021)。在动能降尺度输送较强的对流层中高层 300 hPa 上, 24 日 08 时强对流区域维持较强的西南急流, 强度达到 $45 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上(图 11a), 此时为对流尺度向天气尺度的动

能流失, 对流还未发展。14—18 时, 可以看到高空急流逐渐减弱, 并出现明显断裂(图 11b, 11c), 对应该阶段天气尺度向对流尺度输送动能, 区域强对流天气得到发展而天气尺度系统减弱。值得一提的是, 24 日 20 时至 25 日 04 时左右为对流尺度向天气尺度的动能反馈, 然而该阶段高空急流并未增强, 这也反映了之前提到的扰动场对背景场的反馈作用并不显著这一特点。

与 4.1 节类似, 强对流区的浮力转换也与垂直方向上冷暖空气的活动有关。24 日 14—20 时, 冷空气缓慢扩散南下, 从图 12a 和 12b 可以看出该时段冷空气少动, 维持在 $24^\circ \sim 25^\circ \text{N}$ 附近, 强对流区内 500 hPa 上升运动区范围较小, 冷暖空气对流较弱。24 日 20 时至 25 日 02 时, 南支槽东移引导低层切变及冷空加速南下, 冷空气系统的抬升使得上升运动区范围明显增大(图 12c)。垂直方向上冷暖空气的对流增强, 暖空气上升冷空气下沉促进了斜压扰动能量释放(沙莎等, 2018; 孙思远和管兆勇, 2021), 对应图 10 中该时段更强的浮力转换, 这也体现了该阶段锋面降水的斜压性(孙建华等, 2018)。

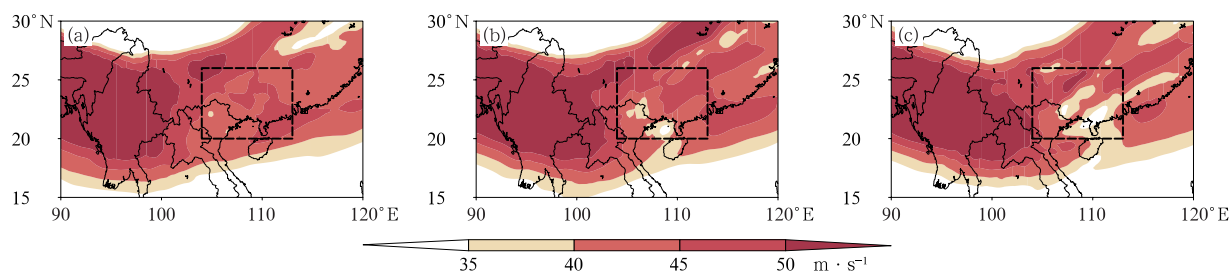


图 11 2020 年 1 月 24 日(a)08 时, (b)14 时, (c)18 时 300 hPa 风速

Fig. 11 Distribution of 300 hPa wind at (a) 08:00 BT, (b) 14:00 BT, (c) 18:00 BT 24 January 2020

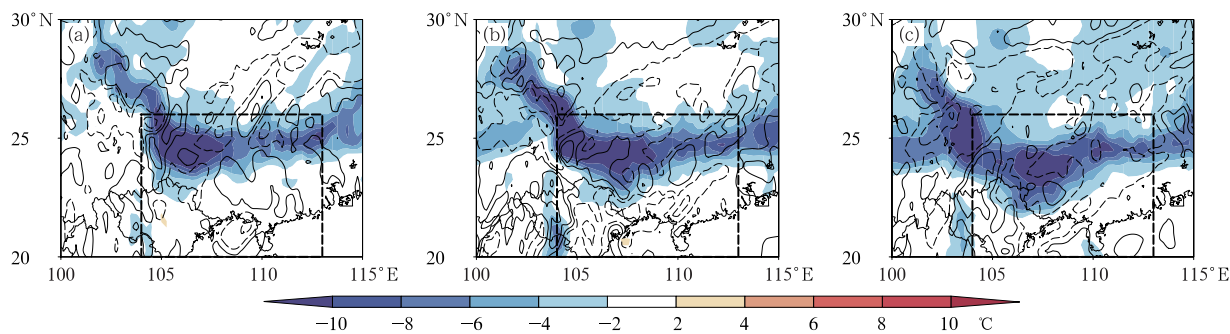


图 12 2020 年 1 月 (a)24 日 14 时, (b)24 日 20 时, (c)25 日 02 时 500 hPa 垂直速度 (虚线为上升, 实线为下沉, 单位: $\text{Pa} \cdot \text{s}^{-1}$) 以及 925 hPa 的 24 h 变温(填色)

Fig. 12 Distribution of 500 hPa geopotential height (dashed line: ascending, solid line: descending, unit: $\text{Pa} \cdot \text{s}^{-1}$) and 24 h temperature change (colored) at 925 hPa at (a) 14:00 BT 24, (b) 20:00 BT 24, and (c) 02:00 BT 25 January 2020

5 结论与讨论

2020年1月24—25日广西出现一次区域性暴雨,过程伴随大范围的强对流冰雹天气,为2000年以来冰雹影响区域最广的一次。南支槽的发展东移是此次区域强对流过程的扰动背景,提供了必要的热动力以及水汽条件。本文利用T-N波作用通量以及多尺度能量诊断方法,从能量转化的角度对本次引发冬季区域强对流的南支槽过程进行了分析,得出以下结论:

(1)整个过程中,中纬度和副热带西风急流均较历史同期偏强,有利于上游波动向下游传播。在急流引导下,欧亚大陆上空存在南北两支活跃的Rossby波列。源自地中海一带的南支副热带西风急流Rossby波列对南支槽起到了主要的调控作用,Rossby波能量沿急流频散并在南支槽区辐合,促进了南支槽的发展东移;源自北大西洋阻塞高压内部的北支Rossby波列则起到了协同作用,其促进了乌拉尔山冷槽的发展及其与中东槽的合并,从而增强了南支波列向下游的传播,进一步增强了南支槽。

(2)南支槽的发展伴随天气尺度有效位能向天气尺度动能的转换,同时还存在动能由背景场向天气尺度扰动输送,两者是南支槽天气尺度扰动动能的主要贡献项。动能的平流输送作用进一步将获得的天气尺度动能的空间上再分配进而维持了南支槽稳定发展东移。气压梯度力做功则作为天气尺度动能汇消耗了部分能量。

(3)在强对流区,浮力转换项和动能跨尺度输送项是对流尺度动能的主要贡献项。有效位能的转化是中低对流层扰动发生发展的稳定能量源,而天气尺度向对流尺度的动能传输在整层积分下表现出显著贡献,表明大尺度背景强迫下的降尺度动能串级是对流活动最主要的能量源。位势通量散度和动能平流输送则将天气尺度传输而来的部分动能向对流层中层再分配。

本文讨论了大气内部Rossby波在此次罕见大范围强对流过程中的作用,然而Rossby波的变化又受到外强迫的调控,如El Niño/La Niña和北大西洋涛动(North Atlantic Oscillation,NAO)等。其中冬季NAO可以通过激发沿急流波导传播的准定常Rossby波列与下游东亚地区的天气气候建立联

系(Watanabe,2004)。当NAO正位相时,地中海激发的南支波列上游向东南方向的波作用通量增强(施春华等,2021),波列传播途经孟加拉湾至高原南侧一带,为南支槽的形成和强度变化提供扰动背景场。在本研究中,2020年1月北大西洋海温异常自南向北呈“负—正—负”分布,北大西洋副极地(北非至地中海)为海平面气压负(正)异常,对应NAO正位相,这在一定程度上为此次过程中Rossby波的活动提供了有利背景,也是在预报中值得关注的前期信号,有必要在未来的工作中探讨。此外,鲜有研究关注文中涉及的广西冬季沿海暖区暴雨中的能量过程,这也值得进一步展开讨论。

参考文献

- 陈海山,刘蕾,朱月佳,2012.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,42(12):1951-1965.
- Chen H S,Liu L,Zhu Y J,2012. Possible linkage between winter extreme low temperature events over China and synoptic-scale transient wave activity[J]. Sci China Earth Sci,42(12):1951-1965(in Chinese).
- 陈婉玲,李秀珍,2022.华南冬季强降水及高、低纬两支波列的协同影响[J].大气科学,46(1):55-69.
- Chen W L,Li X Z,2022. Cooperation of high- and low-latitudes wave trains in the occurrence of extreme winter precipitation over South China[J]. Chin J Atmos Sci,46(1):55-69(in Chinese).
- 广西壮族自治区气象局气象台天气研究室,1977.初夏影响广西的南支西风槽[J].大气科学,1(1):55-60.
- Meteorological Observatory of Kwangsi,1977. The early summer troughs in the southern branch of the westerlies influencing Kwangsi[J]. Chin J Atmos Sci,1(1):55-60(in Chinese).
- 黄荣辉,皇甫静亮,刘永,等,2016.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,40(1):3-21.
- Huang R H,Huangfu J L,Liu Y,et al,2016. Development from the theory of energy dispersion of Rossby waves to studies on the dynamics of quasi-stationary planetary waves[J]. Chin J Atmos Sci,40(1):3-21(in Chinese).
- 江琪,桂海林,徐冉,2020.2020年1月大气环流和天气分析[J].气象,46(4):575-580.
- Jiang Q,Gui H L,Xu R,2020. Analysis of January 2020 atmospheric circulation and weather[J]. Meteor Mon,46(4):575-580(in Chinese).
- 李超,崔春光,王晓芳,等,2017.一次中尺度对流低涡增强阶段的能量诊断分析[J].气象,43(11):1326-1338.
- Li C,Cui C G,Wang X F,et al,2017. Diagnostic analysis on the energy of a mesoscale convective vortex in enhancing stage[J]. Meteor Mon,43(11):1326-1338(in Chinese).
- 李峰,林建,何立富,2006.西风带系统的异常活动对2003年淮河暴雨的作用机制研究[J].应用气象学报,17(3):303-309.
- Li F,Lin J,He L F,2006. The abnormal activity of the westerlies system

- and its impacts on 2003 summer heavy rainfall over Huaihe Basins[J]. *J Appl Meteor Sci*, 17(3):303-309(in Chinese).
- 李刚, 马继望, 梁湘三, 2020. 2008 年 1 月中国南方低温雨雪期间异常阻塞高压事件的多尺度动力过程分析[J]. *气象学报*, 78(1): 18-32. Li G, Ma J W, Liang X S, 2020. A study of the multiscale dynamical processes underlying the blocking high that caused the January 2008 freezing rain and snow storm in southern China[J]. *Acta Meteor Sin*, 78(1):18-32(in Chinese).
- 李言蹊, 陈海山, 2021. 冬季亚洲中纬度极端低温事件与巴伦支-喀拉海异常增暖的关系及联系机制[J]. *大气科学*, 45(4): 889-900. Li Y X, Chen H S, 2021. The relationship between winter extremely low temperature events in mid-latitude Asia and abnormal warming over Barents-Kara Seas and associated mechanism [J]. *Chin J Atmos Sci*, 45(4): 889-900(in Chinese).
- 卢慧超, 梁湘三, 容逸能, 2017. 基于局地多尺度能量涡度分析法 (MS-EVA) 的北半球夏季西太平洋 MJO 动能分析[J]. *大气科学学报*, 40(2): 224-232. Lu H C, Liang X S, Rong Y N, 2017. An energetic study of the boreal summer western Pacific MJO with the localized multi-scale energy and vorticity analysis (MS-EVA)[J]. *Trans Atmos Sci*, 40(2): 224-232(in Chinese).
- 马晓青, 丁一汇, 徐海明, 等, 2008. 2004/2005 年冬季强寒潮事件与大气低频波动关系的研究[J]. *大气科学*, 32(2): 380-394. Ma X Q, Ding Y H, Xu H M, et al, 2008. The relation between strong cold waves and low-frequency waves during the winter of 2004/2005[J]. *Chin J Atmos Sci*, 32(2): 380-394(in Chinese).
- 沙莎, 沈新勇, 李小凡, 2018. 一次梅雨锋暴雨过程中多尺度能量相互作用的研究 II. 实际应用[J]. *大气科学*, 42(5): 1119-1132. Sha S, Shen X Y, Li X F, 2018. The study of multi-scale energy interactions during a Meiyu front rainstorm. Part II: practical application[J]. *Chin J Atmos Sci*, 42(5): 1119-1132(in Chinese).
- 施春华, 蔡雯旻, 金鑫, 2016. 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*, 39(6): 827-834. Shi C H, Cai W Y, Jin X, 2016. Modulation by transient waves of atmospheric longwave anomalies: dynamic mechanism of the super cold wave in South China in the extremely strong El Niño of 2015/2016[J]. *Trans Atmos Sci*, 39(6): 827-834(in Chinese).
- 施春华, 金鑫, 刘仁强, 2017. 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*, 40(6): 850-855. Shi C H, Jin X, Liu R Q, 2017. The differences in characteristics and applicability among three types of Rossby wave activity flux in atmospheric dynamics[J]. *Trans Atmos Sci*, 40(6): 850-855(in Chinese).
- 施春华, 孙伟佳, 郭栋, 2021. 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*, 44(3): 394-404. Shi C H, Sun W J, Guo D, 2021. Synergistic effects of WP and NAO on winter surface temperature in southeastern China [J]. *Trans Atmos Sci*, 44(3): 394-404(in Chinese).
- 孙建华, 卫捷, 傅慎明, 等, 2018. 江淮流域持续性强降水过程的多尺度物理模型[J]. *大气科学*, 42(4): 741-754. Sun J H, Wei J, Fu S M, et al, 2018. The multi-scale physical model for persistent heavy rainfall events in the Yangtze-Huaihe River valley [J]. *Chin J Atmos Sci*, 42(4): 741-754(in Chinese).
- 孙思远, 管兆勇, 2021. 华北地区“16·7”极端强降水事件之环流及扰动能量变化特征[J]. *气象科学*, 41(5): 644-656. Sun S Y, Guan Z Y, 2021. Features of circulation and its related energetics of regional daily precipitation extreme event in North China on July 2016 [J]. *J Meteor Sci*, 41(5): 644-656(in Chinese).
- 索渺清, 丁一汇, 2009. 冬半年副热带南支西风槽结构和演变特征研究[J]. *大气科学*, 33(3): 425-442. Suo M Q, Ding Y H, 2009. The structures and evolutions of the wintertime southern branch trough in the subtropical westerlies [J]. *Chin J Atmos Sci*, 33(3): 425-442(in Chinese).
- 索渺清, 丁一汇, 王遵亲, 2008. 冬半年南支西风 Rossby 波传播及其与南支槽形成的关系[J]. *应用气象学报*, 19(6): 731-740. Suo M Q, Ding Y H, Wang Z Y, 2008. Relationship between Rossby wave propagation in southern branch of westerlies and the formation of the southern branch trough in wintertime [J]. *J Appl Meteor Sci*, 19(6): 731-740(in Chinese).
- 陶诗言, 卫捷, 2006. 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*, 17(5): 513-525. Tao S Y, Wei J, 2006. The westward, northward advance of the subtropical high over the West Pacific in summer [J]. *J Appl Meteor Sci*, 17(5): 513-525(in Chinese).
- 张弛, 沈新勇, 张玲, 等, 2021. 华南飑线升尺度增长过程中的多尺度能量相互作用分析[J]. *热带气象学报*, 37(1): 102-111. Zhang C, Shen X Y, Zhang L, et al, 2021. Analysis of multi-scale energy interaction on the upscale growth of a squall line in South China [J]. *J Trop Meteor*, 37(1): 102-111(in Chinese).
- 张琳, 吕俊梅, 丁明虎, 2020. 2015 年初北北极端气旋对中国寒潮的影响[J]. *应用气象学报*, 31(3): 315-327. Zhang L, Lyu J M, Ding M H, 2020. Impact of Arctic extreme cyclones on cold spells in China during early 2015 [J]. *J Appl Meteor Sci*, 31(3): 315-327(in Chinese).
- 郑建萌, 姚恩, 李蕊, 等, 2021. El Niño 背景下 AO 激发 Rossby 波对云南冬季极端降水的影响[J]. *高原气象*, 40(4): 840-852. Zheng J M, Yao Y, Li R, et al, 2021. Influence of Rossby wave excited by Arctic oscillation on the wintertime extreme precipitation in Yunnan under the background of El Niño [J]. *Plateau Meteor*, 40(4): 840-852(in Chinese).
- Chen H S, Liu L, Zhu Y J, 2012. Possible linkage between winter extreme low temperature events over China and synoptic-scale transient wave activity [J]. *Sci China Earth Sci*, 56(7): 1266-1280.
- Hoskins B J, Ambrizzi T, 1993. Rossby wave propagation on a realistic longitudinally varying flow [J]. *J Atmos Sci*, 50(12): 1661-1671.
- Kodera K, Mukougawa H, Fujii A, 2013. Influence of the vertical and zonal propagation of stratospheric planetary waves on tropospheric blockings [J]. *J Geophys Res: Atmos*, 118(15): 8333-8345.
- Li C, Sun J L, 2015. Role of the subtropical westerly jet waveguide in

- a southern China heavy rainstorm in December 2013[J]. *Adv Atmos Sci*, 32(5):601-612.
- Li J P, Zheng F, Sun C, et al. 2019. Pathways of influence of the Northern Hemisphere mid-high latitudes on East Asian climate: a review[J]. *Adv Atmos Sci*, 36(9):902-921.
- Li X Z, Wen Z P, Huang W R. 2020. Modulation of South Asian jet wave train on the extreme winter precipitation over Southeast China: comparison between 2015/16 and 2018/19[J]. *J Climate*, 33(10):4065-4081.
- Liang X S. 2016. Canonical transfer and multiscale energetics for primitive and quasigeostrophic atmospheres[J]. *J Atmos Sci*, 73(11):4439-4468.
- Liang X S, Anderson D G M. 2007. Multiscale window transform[J]. *Multiscale Model Simul*, 6(2):437-467.
- Plumb R A. 1985. On the three-dimensional propagation of stationary waves[J]. *J Atmos Sci*, 42(3):217-229.
- Takaya K, Nakamura H. 2001. A formulation of a phase-independent wave-activity flux for stationary and migratory quasigeostrophic eddies on a zonally varying basic flow[J]. *J Atmos Sci*, 58(6):608-627.
- Trenberth K E. 1986. An assessment of the impact of transient eddies on the zonal flow during a blocking episode using localized Eliassen-Palm flux diagnostics[J]. *J Atmos Sci*, 43(19):2070-2087.
- Wallace J M, Gutzler D S. 1981. Teleconnections in the geopotential height field during the Northern Hemisphere winter[J]. *Mon Wea Rev*, 109(4):784-812.
- Watanabe M. 2004. Asian jet waveguide and a downstream extension of the North Atlantic oscillation[J]. *J Climate*, 17(24):4674-4691.
- Yeh T C. 1949. On energy dispersion in the atmosphere[J]. *J Atmos Sci*, 6(1):1-16.
- Zhao Y B, Liang X S. 2019. Causes and underlying dynamic processes of the mid-winter suppression in the North Pacific storm track [J]. *Sci China Earth Sci*, 62(5):872-890.

(本文责编:王婷波)