

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^{*}

李 刚¹ 马继望² 梁湘三³

LI Gang¹ MA Jiwang² LIANG Xiangsan³

1. 山东省气象局, 济南, 250031

2. 山东省气象台, 济南, 250031

3. 南京信息工程大学大气海洋动力学实验室, 南京, 210044

1. *Shandong Meteorological Bureau, Jinan 250031, China*

2. *Shandong Meteorological Observatory, Jinan 250031, China*

3. *Center for Ocean-Atmosphere Dynamical Studies, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China*

2019-06-19 收稿, 2019-08-22 改回.

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. 气象学报, 78(1): 18-32

Li Gang, Ma Jiwang, Liang Xiangsan. 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. *Acta Meteorologica Sinica*, 78(1):18-32

Abstract In January 2008, an unusual mid-high latitude blocking high pressure system caused a record-breaking freezing rain and snow storm event in southern China. Using a recently developed functional analysis tool, i.e., the multiscale window transform (MWT), the system is investigated to better understand the underlying mechanisms. By examining the multiscale pattern that is reconstructed, the blocking high is found to originate from the European region; it then became weak and moved eastward. The weakened high, however, regained energy over the Mt. Ural-Lake Baikal region, and persisted henceforth. A new finding is that the previously identified two blocking highs are essentially one single blocking high in two stages. The MWT-based localized multiscale energetics analysis and the theory of canonical transfer were used to investigate the dynamical processes underlying the anomalous event, and find that it was driven by processes on time scales less than 32 d. Specifically, its energy came from the barotropic canonical transfer from less than 32 d scale window to 32–128 d scale window. The canonical transfer was asymmetric about the blocking high, much stronger in the west than in the east. This asymmetry was balanced through a west-to-east energy transport on the 32–128 d scale window to maintain a quasi-stable and homogeneous pattern. The above two internal processes led to the rejuvenation and stagnation of the blocking high, causing the severe, disastrous weather in southern China.

Key words Blocking high, Multiscale window transform, Multiscale energetics, Canonical transfer, Kinetic energy forcing

摘 要 2008年1月, 中国南方发生了罕见的低温雨雪灾害, 造成这次灾害的关键系统之一是乌拉尔山以东地区的异常阻塞高压(阻高)。基于NCEP再分析资料, 利用新发展的多尺度子空间变换和重构分析了这一期间阻高的多尺度特征, 发现其源头来自欧洲地区, 强度减弱后东移, 在乌拉尔山—贝加尔湖地区重新增强并得以维持相当长的时间。结果表明, 两次阻高过程本质上是同一过程在不同阶段的表现。为探讨上述过程的动力学机制, 利用基于多尺度子空间变换的局地多尺度能量分析方法以及正则传输理论对其进行了分析, 发现此次异常阻高过程源自32 d以下尺度系统的动能强迫, 具体地说, 能量来自32 d以下尺度系统向32—128 d低频尺度系统的正压正则传输, 而且这种正则传输在阻高环流的东、西两侧不对称, 西侧在强度上远大于东

^{*} 资助课题: 国家自然科学基金(41975064)、山东省气象局青年基金(2018SDQN02)、山东省气象局重点课题(2017sdqx01)。

作者简介: 李刚, 主要从事短期天气预报研究和业务管理。E-mail: yantailigang@126.com

通信作者: 梁湘三, 主要从事海洋气象及大气动力学研究。E-mail: san@pacific.harvard.edu

侧。分析表明,上述非对称的强迫作用由动能空间输运来平衡,平流将西侧获得的 32—128 d 低频尺度动能向东侧输运,以此来维持阻高环流的整体稳定和均一。上述两种内部的物理过程是高压环流在东移的过程中得以重新增强并长时间维持的机制。

关键词 阻塞高压, 多尺度子空间变换, 多尺度能量, 正则传输, 动能强迫

中图法分类号 P433

1 引 言

2008 年 1 月,中国南方经历了罕见的低温、冰冻和雨雪灾害,此次低温雨雪灾害持续时间超过 20 d,给中国造成了严重的经济损失,交通、供电、通讯和农业等多个领域受到严重影响。此次事件影响范围广,持续时间长,造成的后果严重,引起了众多学者的关注。

研究(丁一汇等, 2008; 李崇银等, 2011; 李艳等, 2012; Zhou, et al, 2009; 杨贵名等, 2008; 王东海等, 2008; 顾雷等, 2008; 高辉等, 2008)已经表明,阻塞高压(阻高)较强的经向环流使得中高纬度的冷空气能够向南输送,使得较低纬度温度降低,而此次灾害期间,阻高环流在乌拉尔山以东长时间维持,是南方低温雨雪灾害形成的至关重要的一个环流因子。针对此次阻高事件维持的原因,王东海等(2008)和 Bueh 等(2011)分析了时间平均下的天气尺度波强迫的作用, Bueh 等(2011)还研究了罗斯贝波频散对此次阻高过程的作用; 李崇银等(2011)认为海温异常对此次事件起到了重要作用。Nath 等(2014, 2016)指出了行星尺度波反射的贡献。虽然已有的工作讨论了天气尺度强迫对阻高的作用,但都是在时间平均的框架下进行的,而此次阻高过程的发展明显不平稳,并且此次阻高与西风带如何相互作用也还未见有研究,多尺度动力过程对其生成、发展、维持和消亡的影响机理尚有待探讨。

已有的工作之所以大都只分析时间平均动力过程,主要是受限于尺度分离工具。文中将采用一种新的泛函分析工具——多尺度子空间变换以及在此基础上提出的局地多尺度能量分析方法来重新审视这次阻高的生消过程。得益于 Lorenz(1955)、Saltsman(1957)和 Kao(1968)等开创性的工作,能量学已经成为探讨阻高演变机理的重要方法,众多研究从多尺度能量循环的角度探讨阻高的生消机理(如 Fournier, 2003, 2001; Hansen, 1981; Hansen, et al, 1982, 1984; Holopainen, 1978; 张培忠, 1998; 缪锦海, 1984; 银燕等, 1992; 陈久康等, 1993; 陆日宇

等, 1996),但受分离方法所限,目前的研究对阻高的局地动力学认识还有待加深。常用的尺度分离方法包括基于时间的分离和基于空间的分离。在时间分离方面,前人主要采用时间平均和扰动的分离方法,显然,在此种框架下只能讨论时间平均意义下的过程,无法区分不同时段可能存在的不同机制;在空间分离方面主要采用谱分解的方法,而传统傅里叶谱的分离是在整个研究区域内进行的,其结果必然会掺杂阻高范围以外的过程,且无法判断不同波数相互作用的具体发生位置,发生在阻高范围外的过程亦可能会被用来解释阻高的演变。综上所述,囿于方法限制,绝大多数对于阻高的多尺度诊断研究在进行尺度分离时损失了部分局地信息(时间或者空间),无法得到任意时刻任意空间点的相互作用信息,导致基于时间的分解无法讨论机制随时间的演变,而基于空间谱的分解则会掺杂许多阻高范围以外的信息,影响最终结果。针对这个问题, Fournier(2002, 2003)提出在小波域内进行尺度分解,虽然该方法部分解决了上述问题,但仍然无法获取完全局地的信息,尺度越大,局地信息损失越大。最近, Liang 等(2005, 2007)和 Liang(2016)取得了理论上的突破,提出局地多尺度能量分析方法,在一组正交基构成的相空间中讨论不同尺度的能量传输,实现了任意时间任意空间点相互作用信息的获取;并且该理论未做任何线性化处理,完整保留了实际过程的非线性信息,能够真实地反应阻高发生过程中任意空间点上非线性多尺度相互作用的时间演变特征。

旨在研究上述异常阻高的多尺度动力过程并解释其中的机理,而在理解大气过程多尺度机理方面,最为关键也是最难的工作是获得不同尺度系统的相互作用信息,文中将从不同尺度系统间能量传输的角度来分析。从后文可以看到,此次阻高过程具有非平稳、非静止的特征,其强度和位置随时间都发生了明显的变化,需要同时获得不同尺度系统之间能量传输随空间和时间的演变信息,这使得传统基于雷诺平均的多尺度框架不再适用(损失了时间或者空间的信息),需要新的多尺度框架来获得不同尺度

系统在空间和时间上都为局地的能量传输信息。基于上述事实,文中将 Liang 等(2005, 2007)和 Liang (2016)发展的多尺度子空间变换和局地多尺度能量分析方法应用于此次过程分析,得到在时间和空间上均完全局地的多尺度能量循环,在此框架下解释此次阻高增强、维持和消亡的机理。

2 方法

主要的研究内容和结论将基于局地多尺度能量循环,而多尺度能量局地信息的获取有两大公认的难题,即局地多尺度能量和局地跨尺度能量传输的正确表达。虽然 Pedlosky (1987)就注意到上述问题,但是由于问题的复杂性, Liang 等(2007, 2016)才提出了完善的解决方案。

2.1 多尺度子空间变换

在过去的多尺度研究中,人们常用滤波来实现尺度分解解决时间平均分解(即雷诺分解)所面临的非平稳背景场的困难。比如对于物理量场 $u(t)$ (此处不考虑其空间变化)能经过滤波分解为慢变部分 $\bar{u}(t)$ 和快变部分 $u'(t)$ 。随之而来的是一个非常基本的物理问题:对于这两部分来说,能量是多少?怎么表达?当 $\bar{u}$ 是常数时(即雷诺分解),众所周知其能量就是 $\bar{u}^2$ 与 $\overline{[u'(t)]^2}$ (略去常数如 $\frac{1}{2}$ 等);但对于一般的非平稳态, $\bar{u}(t)$ 随时间变化,这两部分的能量又是什么?

过去人们通常简单地把 $[u'(t)]^2$ 当作扰动能量(即把雷诺分解能量的平均算子去掉),事实上,这是一个非常基本的物理与数学问题

$$u(t) = \bar{u}(t) + u'(t) = [a_0 \cos t] + [a_1 \cos 10t] \quad (1)$$

式中,下标 0、1 分别表示慢、快过程。那么这些过程的能量又是如何表达的?以往,人们就会简单地把 $[\bar{u}(t)]^2 = [a_0 \cos t]^2$ 和 $[u'(t)]^2 = [a_1 \cos 10t]^2$ 分别当作慢、快过程的能量。然而这种做法从概念上就是错的!正确的结果应该分别是 a_0^2 和 a_1^2 , 如熟知的能量谱的表达。也就是说,多尺度能量是相空间中的傅里叶系数而不是物理空间中的重构场 $a_0 \cos t$ 与 $a_1 \cos 10t$ 的函数。

因此,多尺度能量是相空间中的概念,它通过泛函分析中的 Parseval 关系式与物理空间的对应部分联系起来(见 Liang (2016) 的综述)。事实上,如果 $\bar{u}$ 是常数,即如果式(1)中的 $a_0 \cos t$ 换成 $a_0 \cos(0 \cdot t)$, 则

根据 Parseval 关系式有: $a_1^2 = \overline{[u'(t)]^2}$, 正是雷诺分解的扰动能量表达式。

简言之,多尺度能量实际上是变换系数的平方量。所以,面临的是一个复杂而非常基本的问题,即如何科学准确地表达随时间变化的局地多尺度能量场,因为在传统的滤波器中只有重构、没有变换系数,所以基本上都不可能用来表达多尺度能量。这个问题曾经长时间困扰着学界,直到人们发现滤波与小波分析之间的联系 (Strang, et al, 1997)、并且在 Liang 等(2007)发展了多尺度子空间变换(MWT)后,它才被系统地解决。

Liang 等(2007)发现,对于一些特殊的正交滤波器,也存在着如傅里叶变换与逆变换一样的“变换—重构对”(正交性很重要,否则 Parseval 恒等式不成立,从而物理意义上的能量无法被定义)。这种变换对是 MWT 及其对应的重构,即多尺度子空间重构 (Multiscale Window Reconstruction, MWR)。MWR 如滤波器,其所给出的重构场就是熟知的滤波场,不能用于表达能量,但它对应着一组变换系数,即 MWT 变换系数,可以由此求得相应的多尺度能量。

简单地说, MWT 将一个函数空间分解成一组正交子空间的直和,其中每一个子空间包含这一个特定范围的尺度,这样的子空间被叫做尺度子空间。尺度子空间可以针对时间也可以针对空间,其尺度范围由小波尺度指数界定,文中只考虑针对时间的情况。在 MWT 的框架下,前文例子中的两个不同时间尺度的过程分别对应着两个时间采样空间的变换系数 $\hat{u}_n^{-0}$ 和 $\hat{u}_n^{-1}$, 其中 $(\hat{\cdot})_n^{-\varpi}$ 表示对某一变量表示在第 n 次、在子空间 ϖ 上进行的 MWT 变换, $\varpi = 0, 1$ 分别表示背景场子空间和涡动子空间。这两部分的能量正比于各自的 MWT 变换系数的平方 $(\hat{u}_n^{-0})^2$ 和 $(\hat{u}_n^{-1})^2$ (Liang, et al, 2007)。

2.2 正则传输

在 MWT 的这个框架下, Liang 等(2005)提出了正则传输理论 (canonical transfer; 当时还未严格证明, 被称为“perfect transfer”)。这里仅作简要介绍, 详细内容(包括证明)请参考 Liang (2016)。

假设有标量场 T (可以是矢量场的分量场)置身于一个不可压流场 $\mathbf{u}$ 中, 则其随时间的演化如下

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{u}T) = \cdots \quad (2)$$

式(2)右边包含其他的一些过程, 如外源、耗散等, 这

里不考虑。由于 $\nabla \cdot (\mathbf{u}T)$ 的存在, 不同尺度相互作用的现象就有可能发生。对式(2)两边做多尺度子空间变换, 得到 $\frac{\partial \hat{T}_n^{\sim\omega}}{\partial t} + \nabla \cdot (\widehat{\mathbf{u}T})_n^{\sim\omega} = \dots$, 再乘上 $\hat{T}_n^{\sim\omega}$, 则得到 ω 子空间上的能量演化方程

$$\frac{\partial E_n^{\omega}}{\partial t} = -\hat{T}_n^{\sim\omega} \nabla \cdot (\widehat{\mathbf{u}T})_n^{\sim\omega} + \dots \quad (3)$$

式中, $E_n^{\omega} = (\hat{T}_n^{\sim\omega})^2/2$ 为 ω 子空间上的能量, 右侧第一项为非线性作用在能量方程中的体现。Lorenz (1955) 的多尺度能量方程以全球空间积分形式出现, 因此无法表征局部的动力过程。这个问题很早就引起关注, 历年来也有不少学者想把它扩展到局地形式, 但基本上都只是一个简单拓展、未能从本质上来考虑。Plumb (1983) 曾指出, 这是一个非常复杂的问题, 最根本的是右侧非线性项包含了同尺度的输运过程以及跨尺度的传输过程, 两者很难分离。同尺度输运过程由于在数学上具有散度的形式, 因而对一个闭合系统而言其体积分为 0, 也就是说输运过程仅起到在物理空间内对能量进行再分配的作用, 但不是任何以散度形式表达的过程都是输运过程, 传统的做法 (如 Harrison, et al, 1978) 可能不是唯一的, 从而得到的传输过程不一定反映了真实流体的局部跨尺度能量分配 (如正压失稳、斜压失稳等)。当然这个问题在洛伦兹的全局能量循环中不存在, 因为通过全球积分所有的散度形式的输运过程都被积分掉了 (高斯定理)。针对这个问题, Liang (2016) 证明这种分离在 Liang 等 (2007) 的 MWT 框架下可以严格地推导得到, 并且其形式是唯一的。他们给出的跨尺度传输的数学表达式如下

$$\Gamma_n^{\omega} = \frac{1}{2} \left[(\widehat{\mathbf{u}T})_n^{\sim\omega} \cdot \nabla \hat{T}_n^{\sim\omega} - \hat{T}_n^{\sim\omega} \nabla \cdot (\widehat{\mathbf{u}T})_n^{\sim\omega} \right] \quad (4)$$

此式不但唯一, 而且它还满足以下守恒律

$$\sum_n \sum_{\omega} \Gamma_n^{\omega} = 0 \quad (5)$$

式中, $\sum_n$ 和 $\sum_{\omega}$ 分别表示对所有时间样本和子空间的求和。这种传输严格地表征了不同子空间之间的能量再分配, 它不会产生也不会耗去能量。这一点传统的公式都无法满足 (甚至没有考虑)。为区别起见, Liang (2016) 称这种能量传输为“正则传输”。

式(4)中, 将 T 换成流速则可得到正则动能传输, 换成密度异常则得到正则有效位能传输, 此两者

精确对应着经典地球流体力学中的正压失稳与斜压失稳, 而又没有经典理论中全局性的局限, 能真实地表征流体失稳过程的时间间隙性与空间局地性 (Liang, et al, 2007)。

Liang 等 (2007) 证明, 对于小波尺度为 0 且采用周期延拓的情形, MWT 就等价于传统的雷诺分解。在雷诺分解这个特殊情况下, 正则传输与传统做法的区别在于, 在不考虑除平流项之外的其他项时, 传统平均能量与扰动能量方程具有如下形式

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{1}{2} \overline{T^2} \right) + \nabla \cdot \left(\frac{1}{2} \overline{\mathbf{u}T^2} \right) = -\overline{T} \nabla \cdot (\overline{\mathbf{u}'T'}) \quad (6)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{1}{2} \overline{T'^2} \right) + \nabla \cdot \left(\frac{1}{2} \overline{\mathbf{u}'T'^2} \right) = -\overline{\mathbf{u}'T'} \cdot \nabla \overline{T} \quad (7)$$

等号右边的传输项相加并不相互抵消, 即

$$\overline{T} \nabla \cdot (\overline{\mathbf{u}'T'}) + \overline{\mathbf{u}'T'} \cdot \nabla \overline{T} = \nabla \cdot (\overline{\mathbf{u}'T'} \nabla \overline{T}) \neq 0 \quad (8)$$

这不应是一个能信实反映流体内部过程的量, 因为两个尺度间给予与接受的能量不等, 导致能量不守恒。而在 MWT 框架下导出的正则传输和能量方程为如下形式

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{1}{2} \overline{T^2} \right) + \nabla \cdot \left(\frac{1}{2} \overline{\mathbf{u}T^2} + \frac{1}{2} \overline{\mathbf{u}'T'^2} \right) = -\Gamma \quad (9)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{1}{2} \overline{T'^2} \right) + \nabla \cdot \left(\frac{1}{2} \overline{\mathbf{u}'T'^2} + \frac{1}{2} \overline{\mathbf{u}T'^2} \right) = \Gamma \quad (10)$$

式中, $\Gamma = (1/2) [\overline{T} \nabla \cdot (\overline{\mathbf{u}'T'}) - \overline{\mathbf{u}'T'} \cdot \nabla \overline{T}]$ 为正则传输项, 该项在平均和扰动能量方程中只相差一个负号, 两者相加抵消, 能量守恒。因此, 它精确地表征了涡动/扰动场与背景流之间的能量传输。事实上也如此, Liang 等 (2007) 通过对郭晓岚正压模式的分析发现用传统的 $-\overline{\mathbf{u}'T'} \cdot \nabla \overline{T}$ 得出的正压传输并不能表征该模型中的局地不稳定结构, 而用上述正则传输则可以精确地反映此结构。

2.3 局地多尺度能量分析方法

基于上述理论框架, 大气的局地多尺度动能收支方程可表达如下 (详细推导见 Liang, 2016)

$$\begin{aligned} \frac{\partial K^{\omega}}{\partial t} + \underbrace{\nabla \cdot \left[\frac{1}{2} (\widehat{\mathbf{v}\mathbf{v}_h})^{\sim\omega} : \nabla \hat{\mathbf{p}}_h^{\sim\omega} - \left[\nabla \cdot (\widehat{\mathbf{v}\mathbf{v}_h})^{\sim\omega} \right] \cdot \hat{\mathbf{p}}_h^{\sim\omega} \right]}_{\nabla \cdot \mathbf{Q}_K^{\omega}} = \\ \underbrace{\frac{1}{2} \left\{ (\widehat{\mathbf{v}\mathbf{v}_h})^{\sim\omega} : \nabla \hat{\mathbf{p}}_h^{\sim\omega} - \left[\nabla \cdot (\widehat{\mathbf{v}\mathbf{v}_h})^{\sim\omega} \right] \cdot \hat{\mathbf{p}}_h^{\sim\omega} \right\}}_{\Gamma_K^{\omega}} - \\ \underbrace{\nabla \cdot (\hat{\mathbf{p}}^{\sim\omega} \hat{\Phi}^{\sim\omega})}_{\nabla \cdot \mathbf{Q}_P^{\omega}} - \underbrace{\hat{\omega}^{\sim\omega} \hat{\alpha}^{\sim\omega}}_{b^{\omega}} + F_K^{\omega} \end{aligned} \quad (11)$$

式中, b 为浮力转换, Q 为通量, F 为扩散和耗散, 而 Γ 为跨尺度正则传输。下标 K 为动能, 上标 ϖ 为尺度窗口, 其他的符号是公知的。需要强调的是, 在局地多尺度能量分析方法的框架下, 跨尺度传输的意义与已有的经验传输完全不同, 该传输保证了任意两个尺度间能量传输之和为 0, 满足了跨尺度传输只是能量的再分配而不会产生或消耗能量的物理本质, 而这是以往的方法中无法得到的。如前所述, Liang 等(2007)已经证明了动能和有效位能的正则传输精确对应着地球流体力学中的正压和斜压不稳定。由式(1)可知, 该方法可以在局地的前提下精确地讨论能量的空间输运($\nabla \cdot Q_K^\varpi$)、能量的跨尺度传输(Γ_K^ϖ)、动能和有效位能的转换(b^ϖ)以及压力做功($\nabla \cdot Q_p^\varpi$)等过程, 因此, 可以用来研究此次阻高过程演变中的局地能量特征, 进而解释其在发生、发展、维持和消亡的局地机制; 并且根据正则传输理论, 还可以定量讨论正压和斜压不稳定对阻高演变的影响, 而这是其他方法无法实现的。该方法已经在平流层爆发性增温(Xu, et al, 2017)、风暴轴(赵远冰等, 2018, 2019; Zhao, et al, 2018)、台风(Wang, et al, 2017)和黑潮延伸体(Yang, et al, 2019)等大气和海洋过程中得到了应用。

3 资料 and 计算

采用 NCEP 再分析资料(Kalnay, et al, 1996), 包括温度(T)、三维风场(u, v, ω)和位势高度场。时间分辨率为 6 h, 空间分辨率为 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ 。南北方向包含赤道— $87.5^\circ N$, 东西方向包含整个纬圈, 垂直方向包含 1000、925、850、700、600、500、400、300、250、200、150 和 100 hPa, 共 12 层。由于多尺度子空间变换需要输入的时次为 2 的幂(见 Liang, et al, 2007), 所选取的时间为 2007 年 5 月 10 日到 2008 年 10 月 2 日, 一共 2^{11} 个时间点。

文中多尺度子空间变换作为一种特殊的“滤波器”, 在保证能量守恒的前提下, 将相关变量(X)分解到 3 个尺度中, 分别得到 X^0 、 X^1 和 X^2 , 其中 0、1 和 2 分别代表 128 d 以上、32—128 d 以及 32 d 以下的信号, 为了论述的直观, 将上述 3 个尺度分别称之为基本气流尺度、阻塞高压尺度和天气尺度, X 代表温度(T)、三维风场(u, v, ω)以及位势高度。然后将尺度分解后的变量代入到式(1)中, 得到图 1 所示各个

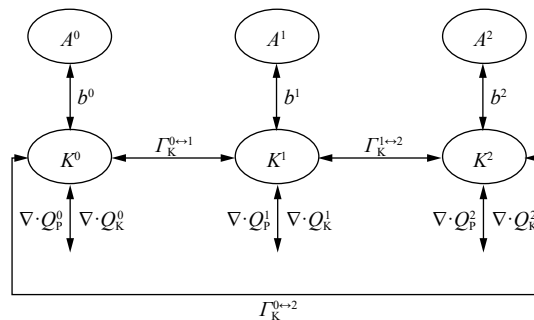


图 1 3 个尺度子空间的多尺度能量过程
(0、1、2 分别表示基本气流尺度窗口、阻塞高压尺度窗口以及天气尺度窗口, 图中符号与式 (1) 一致)

Fig. 1 The energy processes in a three-scale window decomposition (the numbers 0, 1, and 2 indicate the basic-flow window, blocking window, and synoptic window, respectively. The symbols are the same as in Eq.(1))

物理过程的值, 包括两类过程: 一类是同一尺度内的过程, 包括压力做功、动能空间的输运和动能与有效位能之间的浮力转换, 另一类是尺度之间动能的正则传输。

4 低温雨雪灾害期间中高纬度位势高度演变特征及阻高尺度位势高度演变特征

从 2008 年 1 月低温雨雪灾害期间中高纬度阻高位势高度的演变过程(图 2)可以发现, 1 月 7 日, 欧洲地区阻塞高压强度最强, 而从 1 月 10 日开始, 欧洲地区阻高减弱消失, 在乌拉尔山以东贝加尔湖以西出现阻高的信号(后文简称乌山-贝湖阻高)并逐渐增强, 该阻高过程于 19—22 日达到最强, 随后减弱, 于 31 日之后基本消失。对比中国南方低温雨雪灾害发生的时段以及此次阻高事件维持的时段可以发现, 两者几乎同时开始同时结束, 这也从侧面说明了此次阻高事件对于中国南方低温雨雪灾害的作用之关键。

前面描述的位势高度演变过程中有一个关键的问题, 即乌山-贝湖阻高事件是欧洲地区阻高东移的结果还是本地生成? 另外, 图 2 显示 16—19 日欧洲地区的高度场有增强的趋势, 该结果是乌山-贝湖阻高西退或是本地过程影响也不清楚。图 2 的结果无法回答上述问题的关键原因在于其所展示的是所有尺度叠加的结果, 该结果不仅有阻高尺度的信号, 也有基本气流和天气尺度演变的特征, 各个尺度的信

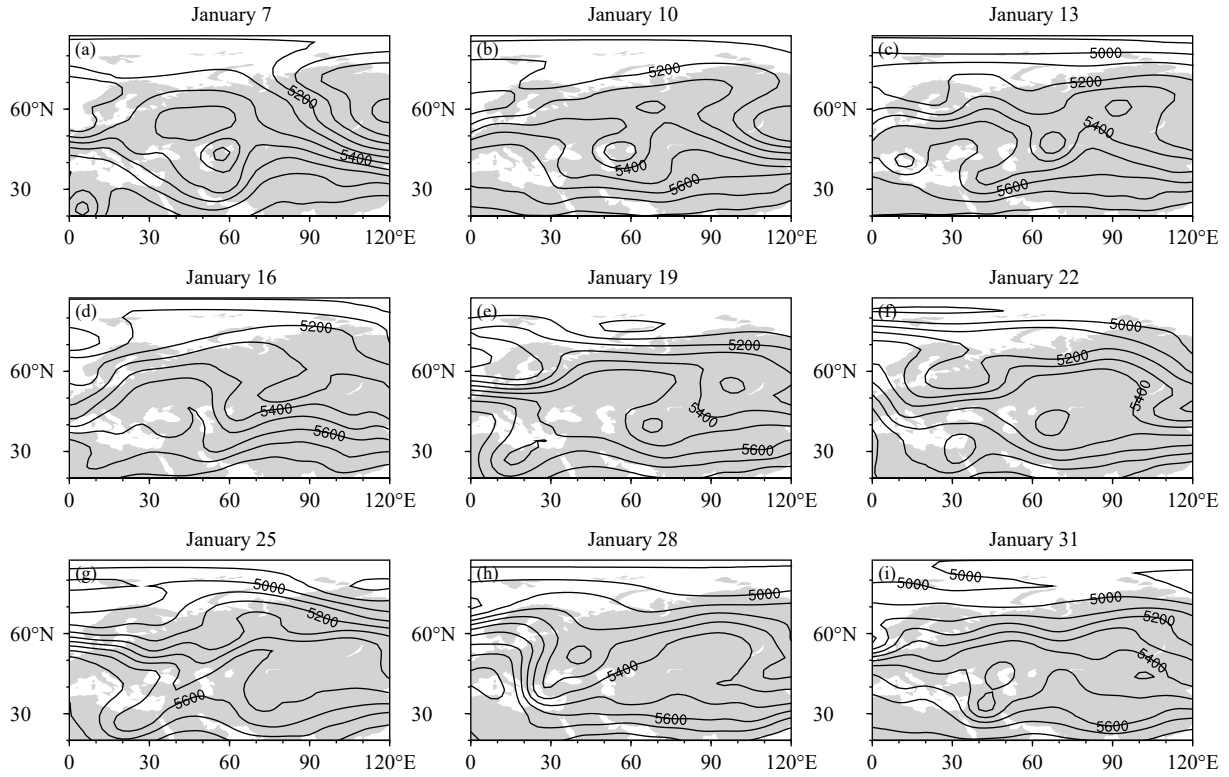


图 2 2008 年 1 月低温雨雪灾害期间位势高度 (单位: gpm) 演变

Fig. 2 Evolution of the geopotential height (unit: gpm) during the event

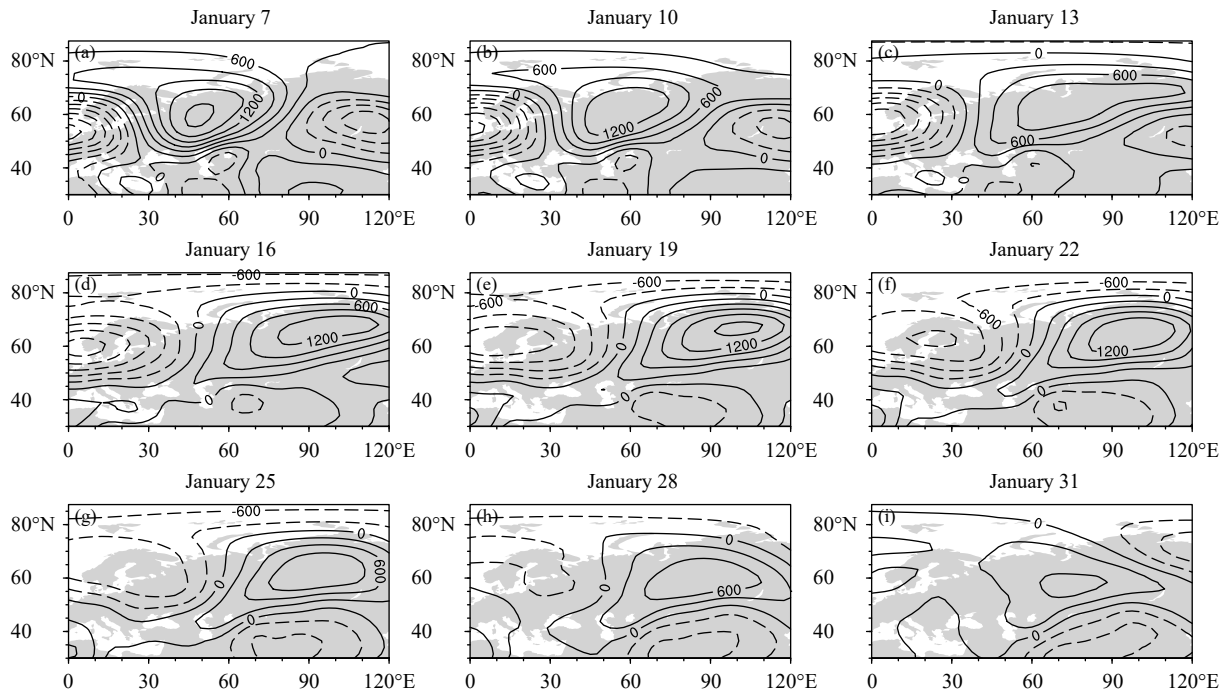


图 3 2008 年 1 月 7—31 日 500 hPa 上阻塞高压尺度的位势高度 (单位: gpm) 演变

(实线表示正值, 虚线表示负值)

Fig. 3 Temporal evolution of the blocking-scale geopotential height (unit: gpm)

(The solid and dashed lines represent positive and negative values, respectively)

号混淆其中,无法判断某一过程是阻高移动还是其他过程的影响。因此,文中应用前述新的泛函分析工具——多尺度子空间变换和重构对原始场进行了尺度分解,具体结果如图3。需要指出的是,如方法介绍中所述,该泛函分析工具在分解的过程中保证了能量的守恒,并且各个尺度的能量可以简单地用变换系数的平方来表示,不仅起到了尺度分解的作用,同时也为后续研究该过程的动力学机制奠定了基础。

研究(Ma, et al, 2017)发现,阻高过程主要由低

频信号来控制;经过调整不同的时间窗口边界,发现32—128 d的信号能够包含此次阻高事件的主要信号。从分离后阻高尺度的演变特征(图3)可以清晰的看出,乌山-贝湖阻高事件是欧洲阻高减弱东移后异常增强并且维持的结果,7日欧洲阻高强度较强,而10日开始减弱,13日当高压环流移动到乌拉尔山以东贝加尔湖以西后又重新加强,并于19—22日达最强(如图3和4中的等值线所示),随后开始减弱直到消亡。李艳等(2012)通过分析阻高指数的Hovmöller图发现,1月包含两次阻高过程,而本文

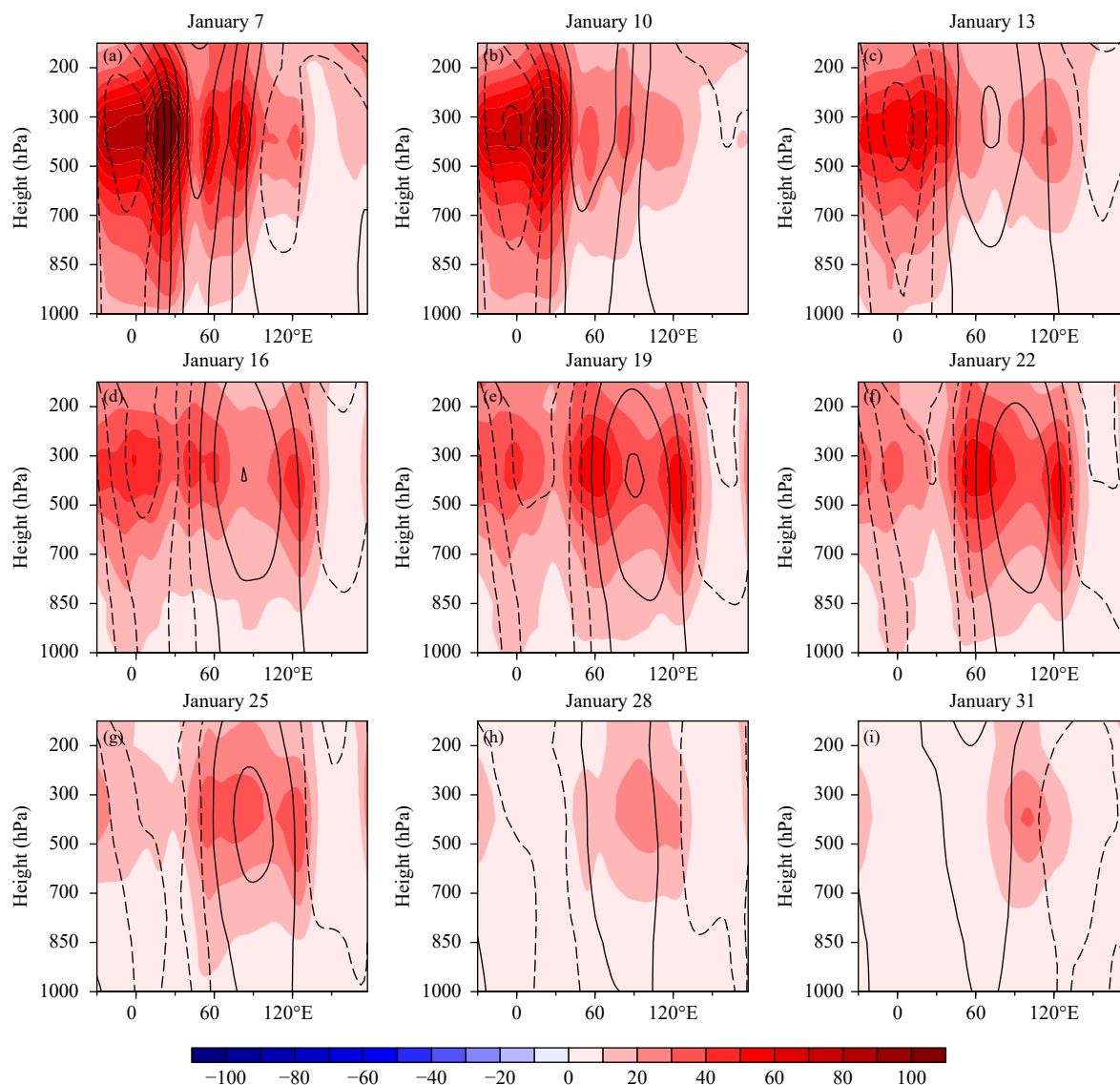


图4 阻高尺度经向平均(45° – 80° N)动能(K^1 , 色阶, m^2/s^2)和位势高度(等值线, gpm)的纬向-垂直剖面

Fig. 4 Zonal-vertical cross sections of the blocking-scale kinetic energy (K^1 , shaded, unit: m^2/s^2) and geopotential height (contours, unit: gpm) averaged over 45° – 80° N

从环流的角度出发,发现这个事件本质上是同一过程的不同阶段,只是欧洲阻高在东移之前强度有明显的减弱。

综上所述,2008 年 1 月的阻高特征主要表现为欧洲地区阻高减弱东移后在乌拉尔山—贝加尔湖地区重新加强并维持的特点,而其加强并维持的过程为中国南方低温雨雪灾害期间冷空气南下提供了稳定的环流条件,因此,分析减弱东移的阻高如何加强并维持的机制是理解此次环流异常的关键,后文将

对此进行探讨。

5 低温雨雪灾害期间阻高的动力学机制分析

如上所述,利用多尺度子空间变换和重构方法将原始场分解为基本气流尺度、阻塞高压尺度和天气尺度,在此基础上计算了阻塞高压尺度的动能演变特征(图 4 中色阶)。从动能的角度来看,其演变特征跟上文分析的环流特征一致,7 日欧洲地区阻高的强度较强,而到 10 日其强度迅速减弱并缓慢东移

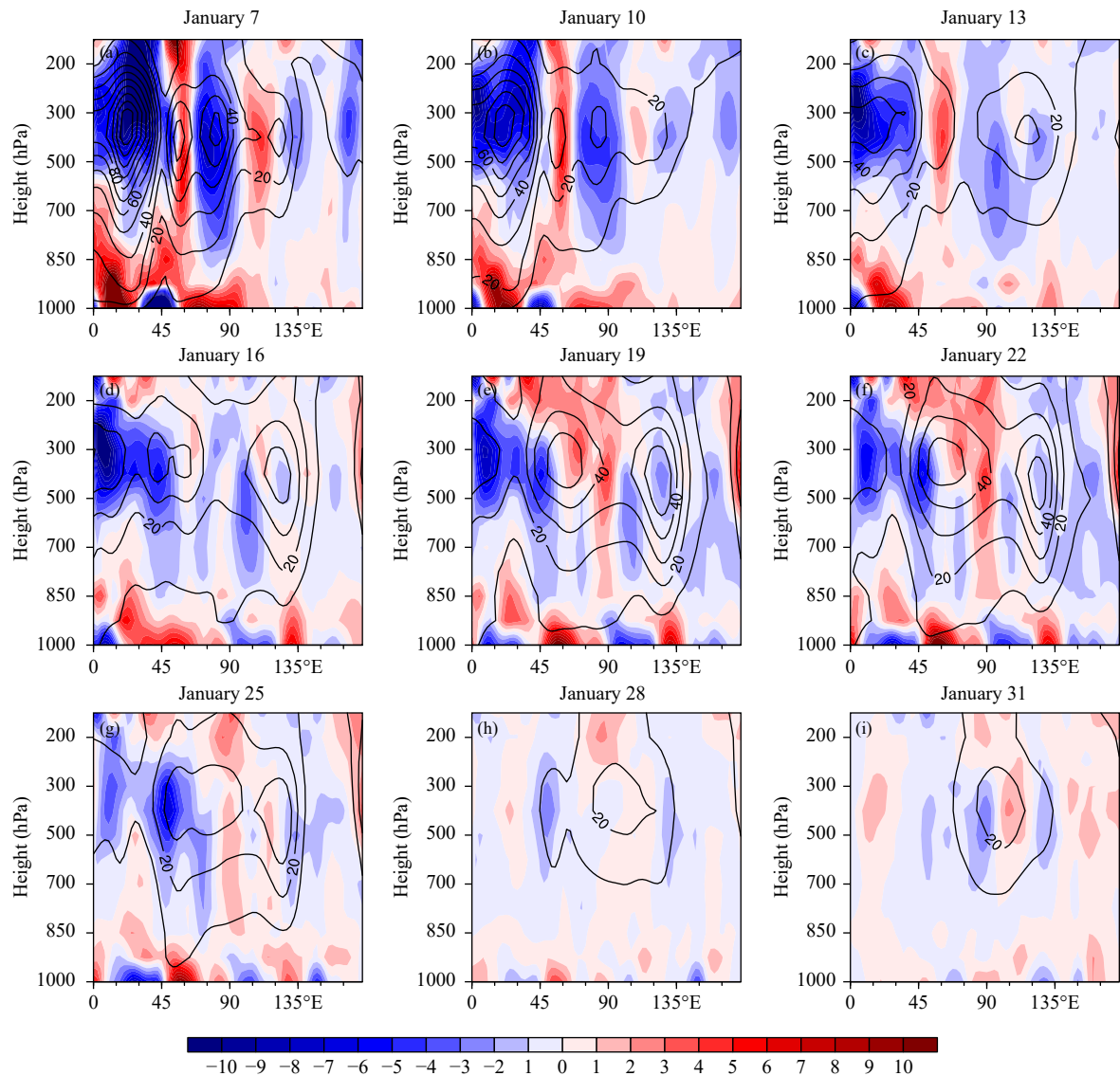


图 5 阻高尺度内经向平均 (45° – 80° N) 的压力做功 ($-\nabla \cdot \mathbf{Q}_p^1$, 色阶, $10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}^3$) 和动能 (等值线, m^2/s^2) 纬向-垂直剖面

Fig. 5 Zonal-vertical cross sections of the blocking-scale pressure work ($-\nabla \cdot \mathbf{Q}_p^1$, shaded, unit: $10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}^3$) and kinetic energy (contours, unit: m^2/s^2) averaged over 45° – 80° N on the blocking-scale window

到乌拉尔山—贝加尔湖地区,而后从13日稳定在乌拉尔山—贝加尔湖地区并开始异常增强,并于19—22日达到最强,随后开始衰减。

为了分析上述过程的动力学机理,在多尺度能量学分析方法的框架下,利用式(1)对动能演变的原因进行了诊断。如方法中介绍,在多尺度能量学的框架下,造成某一尺度能量演变的过程主要包含压力做功、动能在空间的输运、动能的跨尺度传输和浮力转换等,图5—9(红色代表对动能增加有正的贡献,蓝色表示负的贡献,其中的等值线为动能)分别展示了这些过程随时间的演变。

从图4的色阶和图5的等值线可以清楚地看出,在分析的整个阶段,阻高的东、西边缘分别出现两个动能的极值中心,并且跟随阻高一起向东移动;7—10日主要出现在20°E和80°E附近,随后这两个中心迅速减弱并东移;13日分别到达30°E和120°E附近,此后动能开始加强并继续东移;于19日到达60°E和120°E并一直维持至25日,随后两个动能极值中心减弱消散。根据上述特征,将整个过程分成4个阶段,即13日之前减弱东移阶段、13日之后加强并继续东移阶段、19—25日维持阶段以及25日之后减弱阶段。

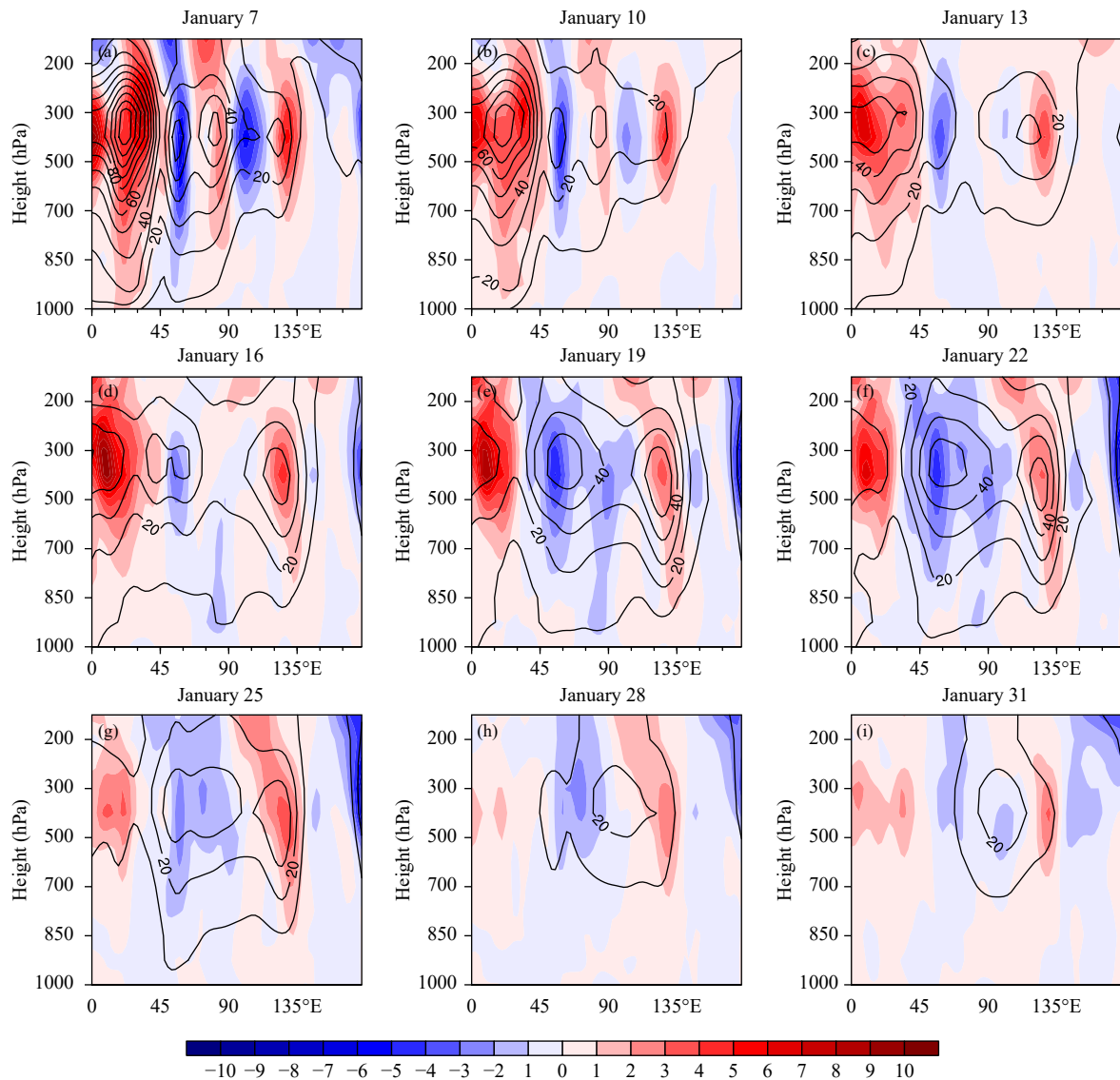


图6 阻高尺度内经向平均(45°–80°N)的动能空间输运($-\nabla \cdot \mathbf{Q}_K^1$, 色阶, $10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}^3$)和动能(等值线, m^2/s^2)纬向-垂直剖面

Fig. 6 Zonal-vertical cross sections of the kinetic energy transport ($-\nabla \cdot \mathbf{Q}_K^1$, shaded, unit: $10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}^3$) and kinetic energy (contours, unit: m^2/s^2) averaged over 45°–80°N on the blocking-scale window

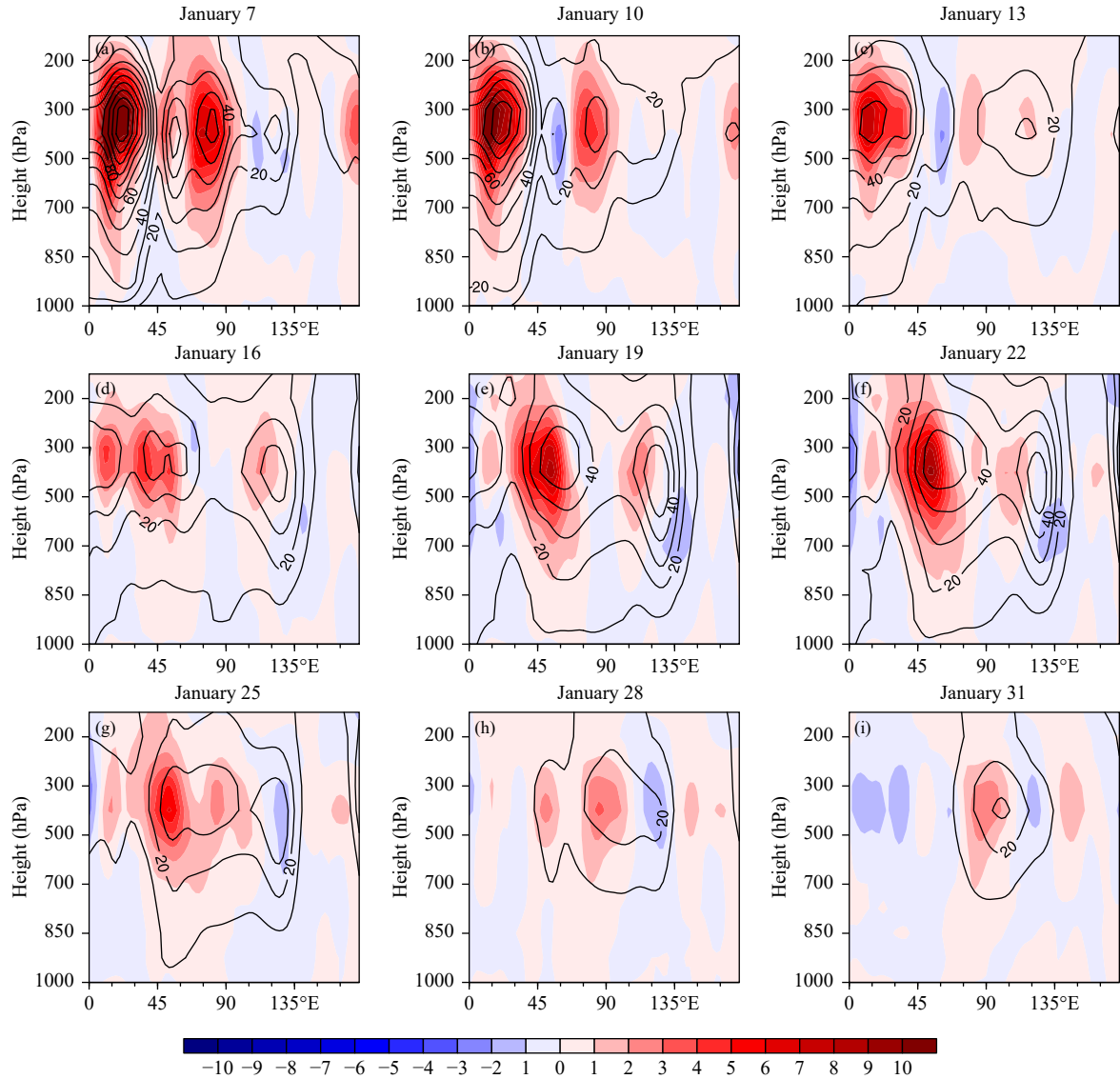


图 7 经向平均 (45°–80°N) 的天气尺度向阻高尺度动能正则传输 ($\Gamma^{2 \rightarrow 1}$, 色阶, $10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}^3$) 和阻高尺度动能 (等值线, m^2/s^2) 纬向-垂直剖面

Fig. 7 Zonal-vertical cross sections of the KE canonical transfer ($\Gamma^{2 \rightarrow 1}$, shaded, unit: $10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}^3$) from the synoptic-scale window to the blocking-scale window and kinetic energy (contours, unit: m^2/s^2) on the blocking-scale window averaged over 45°–80°N

如图 5 所示, 13 日之前阻高动能减弱的原因因为压力做功 ($-\nabla \cdot \mathbf{Q}_p^1$) 负的贡献引起的, 而图 6 和 7 显示, 在该阶段, 动能的空间输运 ($-\nabla \cdot \mathbf{Q}_k^1$) 以及天气尺度向阻高尺度动能的传输 ($\Gamma^{2 \rightarrow 1}$) 都对阻高尺度的动能有正的贡献, 起到了延缓阻高在欧洲地区减弱速度的作用。

如图 7 所示, 在 13 日之后的东移加强阶段以及 19–25 日的维持阶段, 其能量来源为天气尺度向阻高尺度的动能传输, 因此, 使得在欧洲地区减弱的阻

高异常加强并维持的主要机制为天气尺度强迫, Luo 等 (2014, 2019) 在理论模型中也发现了高频尺度对阻高低频环流的重要作用。此外, 图 7 表明在维持阶段天气尺度强迫主要作用于阻高西侧边界的动能极值中心, 而其东侧动能极值中心表现为向基本气流尺度的动能反馈 ($\Gamma^{1 \rightarrow 0}$), 有动能的损耗 (图 8), 而从图 6 可以发现, 动能的空间输运不断补充此处的动能损耗, 使得环流得以维持。25 日之后, 随着天气尺度强迫的减弱, 高压环流得到的动能不足以抵

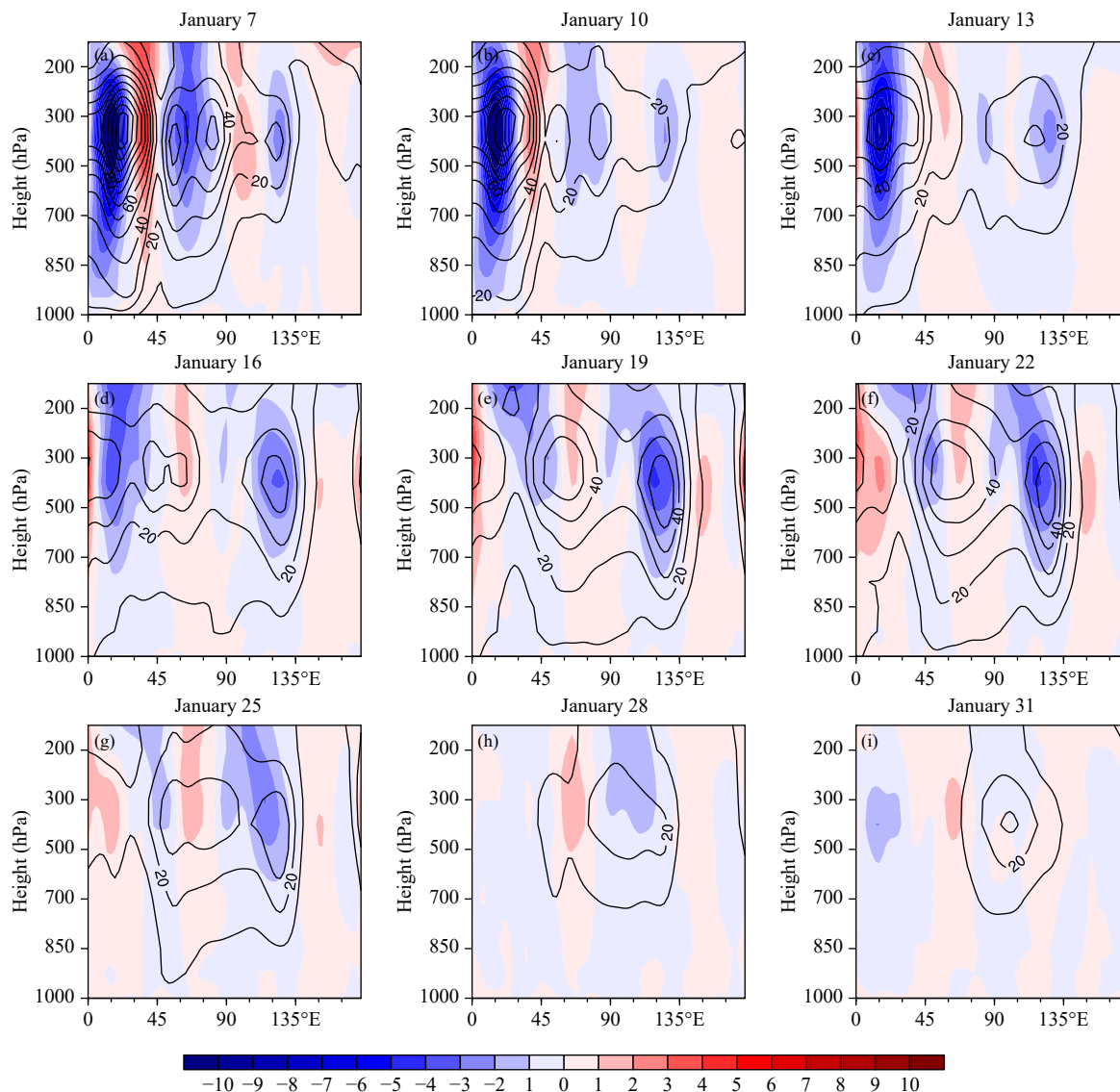


图8 经向平均 (45° – 80° N) 的基本气流向阻高尺度动能正则传输 ($T^{0 \rightarrow 1}$, 色阶, $10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}^3$) 和阻高尺度动能 (等值线, m^2/s^2) 纬向-垂直剖面

Fig. 8 Zonal-vertical cross sections of the KE canonical transfer ($T^{0 \rightarrow 1}$, shaded, unit: $10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}^3$) from the basic flow window to the blocking-scale window and kinetic energy (contours, unit: m^2/s^2) on the blocking-scale window averaged over 45° – 80° N

消损耗, 逐渐减弱消退。

另外, 从图9可以看出, 在增强、维持和减弱的整个过程中, 虽然阻高尺度内有效位能向动能转换 ($-b^1$) 的作用相对其他过程偏小, 但是在整个环流内几乎都是正的贡献, 该作用在积分之后非常显著, 详见下节的分析。

6 阻高过程不同阶段的洛伦兹能量循环

为定量地分析阻高尺度在各个阶段能量演变的

原因, 图10—12分别给出了此次阻高过程异常增强 (13—18日)、维持 (19—25日) 和消亡 (26—31日) 3个阶段的洛伦兹能量循环。该能量循环是空间三维积分的结果, 积分区域的水平范围为 (45° – 80° N, 45° – 150° E), 垂直区域为 1000—100 hPa, 该区域包含了阻高过程动能的集中区域 (见图4)。

从3个阶段的洛伦兹能量循环可以看出, 整个过程中对动能正贡献最大的过程是天气尺度动能向阻高尺度的正则动能传输, 阻高强度随该传输强弱

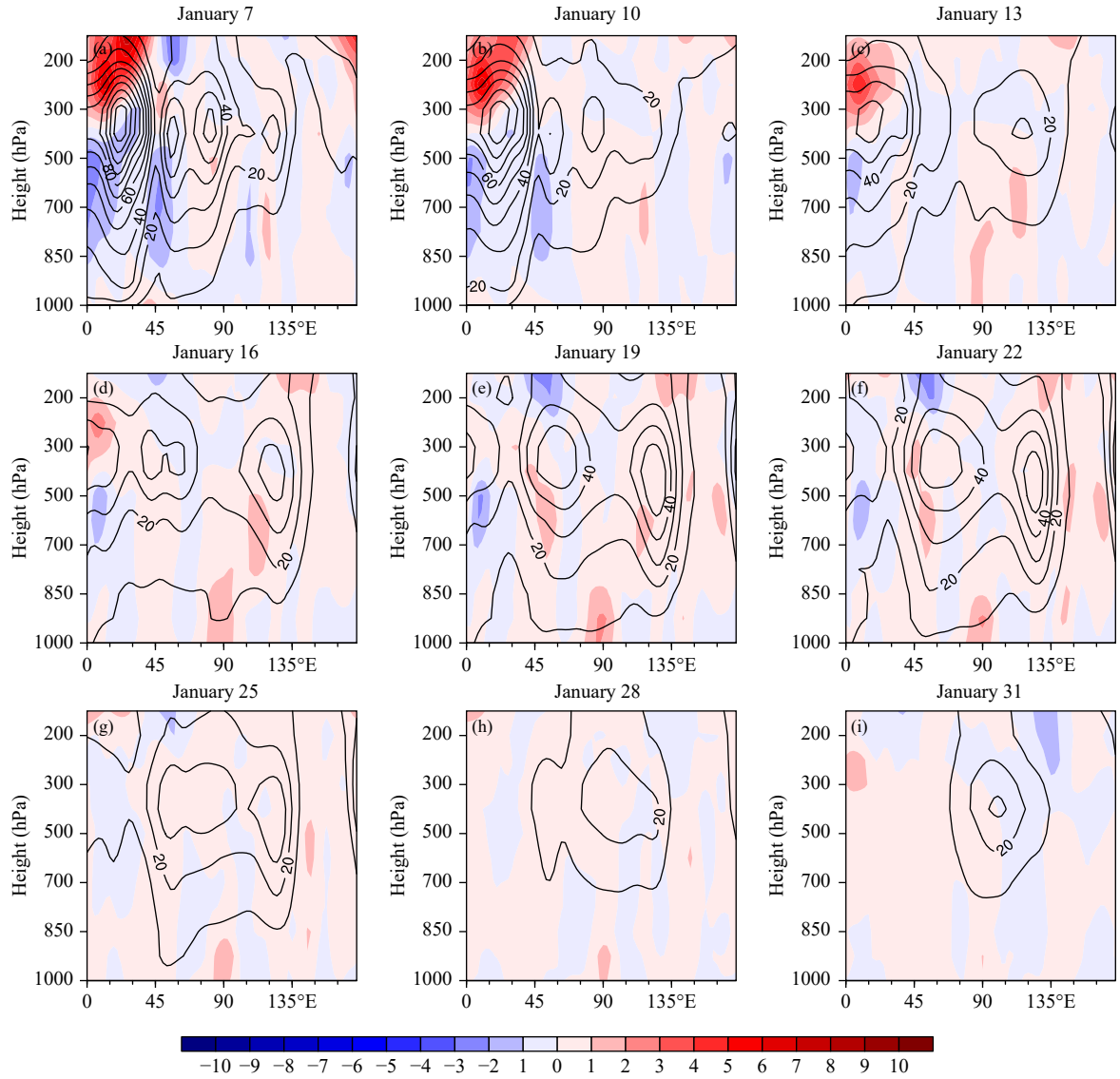


图 9 阻高尺度内经向平均 (45° – 80° N) 的有效位能向动能转换 (色阶, $10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}^3$) 和动能 (等值线, m^2/s^2) 纬向-垂直剖面

Fig. 9 Zonal-vertical cross sections of buoyancy conversion (shaded, unit: $10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}^3$) and kinetic energy (contours, unit: m^2/s^2) averaged over 45° – 80° N on the blocking-scale window

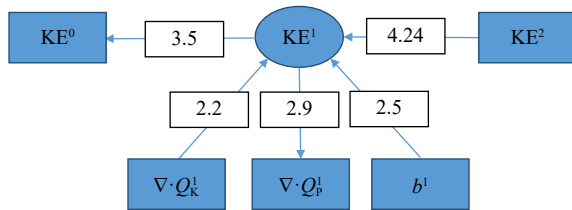


图 10 增强阶段 (13–18 日) 的洛伦兹能量循环 (单位: $10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}^3$)

Fig. 10 Lorenz energy cycle (unit: $10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}^3$) averaged over the amplification phase (13–18 January)

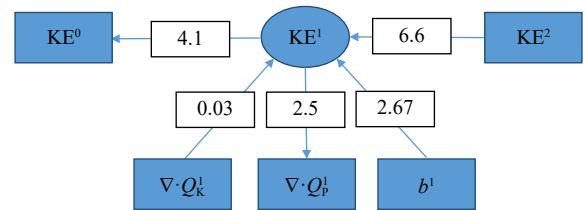


图 11 维持阶段 (19–25 日) 的洛伦兹能量循环 (单位: $10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}^3$)

Fig. 11 Lorenz energy cycle (unit: $10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}^3$) averaged over the maintenance phase (19–25 January)

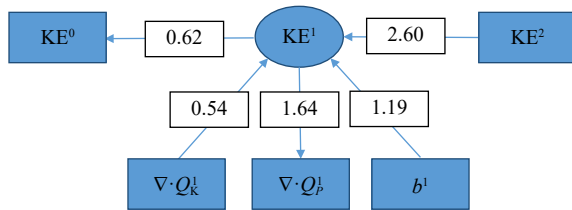


图 12 消亡阶段 (26—31 日) 的洛伦兹能量循环
(单位: $10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}^3$)

Fig. 12 Lorenz energy cycle (unit: $10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}^3$) averaged over the decay phase (26–31 January)

而变; 13—18 日, 较强的天气尺度动能传输使得乌拉尔山—贝加尔湖阻高开始异常增强; 随后, 更强的传输使得阻高在 19—25 日持续维持; 26 日之后, 该传输变弱, 阻高开始逐渐消亡。这与前文分析的结果一致, 即此次过程最主要的能量来源是天气尺度的强迫。

另外, 从 3 个阶段阻高尺度与基本气流尺度的动能传输可以看出, 在整个增强、维持和消亡阶段, 阻高尺度向基本气流尺度始终有动能的反馈, 结合上述天气尺度向阻高尺度的动能传输可以得出: 此次过程中, 动能呈现升尺度传输的特点。

对于动能空间的输运过程, 图 10 表明, 该过程在增强阶段起到了重要的作用; 但是在维持和消亡阶段, 整个阻高与阻高以外区域的能量输运非常小(图 11 和 12)。但是, 通过图 6 可以发现, 动能空间的输运起到了使阻高动能内部再分配的作用, 即将西侧从天气尺度获得的动能向阻高的东侧输运, 以此来维持阻高的环流结构。

此外, 在整个阶段中, 压力做功始终起到了消耗动能的作用; 而有效位能向动能的转换起到了增加动能的作用。

7 总结与讨论

2008 年 1 月中下旬, 阻高过程在乌拉尔山和贝加尔湖之间异常维持, 是造成中国南方严重低温雨雪灾害的主要环流因子。此次阻高过程的强度较大并且持续时间长, 为了探讨此次异常阻高的多尺度特点及形成机理, 采用一套新的理论——多尺度子空间变换和多尺度能量分析对此过程进行了分析。

首先, 利用新发展的多尺度子空间变换(MWT)将相应的变量分解到 3 个尺度子空间中, 分别为基本气流尺度子空间(128 d 以上)、阻塞高压尺度子空

间(32—128 d)和天气尺度子空间(32 d 以下); 其中阻塞高压尺度内信号的演变与实际阻高过程的演变一致, 说明该尺度子空间内的信号很好地刻画了阻高的特征, 通过对阻高尺度子空间内的信号进一步分析发现, 前人发现的先后发生于欧洲和乌拉尔山以东—贝加尔湖以西的两次阻高过程本质上为同一阻高环流的不同阶段: 乌拉尔山—贝加尔湖的阻高过程实质为欧洲地区阻高环流减弱东移后在乌拉尔山—贝加尔湖地区又重新加强的结果。

为了探讨阻高环流在乌拉尔山—贝加尔湖地区异常加强并且长时间维持的机制, 文中利用基于 MWT 的局地多尺度能量分析方法以及正则传输理论分析了阻高尺度环流在该地区增强、维持和消亡 3 个阶段的多尺度能量学。该方法在能量尺度分解和多尺度能量诊断的过程中完全保留了时间和空间上同时局地的多尺度能量信息, 使得在分析此次阻高不同阶段机制的同时, 还能得到各个多尺度能量学过程的空间分布, 来了解环流空间的演变机理, 这是现时其他多尺度能量学分析工具做不到的。不同阶段的分析结果表明, 天气尺度向阻高尺度的动能正则传输(天气尺度强迫)是此次阻高过程异常增强和维持的根本原因; 贝加尔湖以西的天气尺度强迫使得移动到此处的阻高环流开始加强, 天气尺度强迫的进一步加强及维持使得阻高环流在此处长时间维持, 而随着天气尺度强迫的减弱阻高环流减弱消失。Ma 等(2017)也发现了类似的天气尺度强迫对大西洋地区阻高发展的重要作用。另外, 通过分析多尺度能量学的空间信息, 发现天气尺度强迫对阻高环流的作用具有非对称的特征, 其主要作用于环流的西侧, 而东侧的作用很弱, 这样的结构势必会造成环流结构的不均匀; 而进一步的分析发现, 阻高尺度内动能的空间输运起到了将阻高环流西侧动能向东侧输运的作用, 这保证了阻高环流东西两侧的均匀发展, 使其得以长时间维持。

通过分析结果可以发现, 此次过程在时间上是一直在发展演变的, 即非平稳的; 而主要的强迫作用在空间上也是非对称的, 即非各向同性的; 这说明传统方法基于时间平均或者空间平均的处理所损失掉的时间或者空间信息, 对于深入理解实际过程的演变机理是不可或缺的。期待 MWT 以及基于 MWT 的局地能量分析法能在这些传统方法的盲区发挥应有的作用。另外, 文中讨论的只是一次个例, 是否所有类似的过程都具有相同的机制还不清楚, 在后续

的工作中, 还需要对相似的个例进行合成分析。

参考文献

- 陈久康, 银燕. 1993. 阻塞过程中大气运动不同时间尺度分量的演变及其相互作用. 南京气象学院学报, 16(2): 180-185. Chen J K, Yin Y. 1993. Variations of the different time-scale components of the atmospheric motion during the process of a blocking. J Nanjing Inst Meteor, 16(2): 180-185 (in Chinese)
- 丁一汇, 王遵亲, 宋亚芳等. 2008. 中国南方 2008 年 1 月罕见低温雨雪冰冻灾害发生的原因及其与气候变暖的关系. 气象学报, 66(5): 808-825. Ding Y H, Wang Z Y, Song Y F, et al. 2008. Causes of the unprecedented freezing disaster in January 2008 and its possible association with the global warming. Acta Meteor Sinica, 66(5): 808-825 (in Chinese)
- 高辉, 陈丽娟, 贾小龙等. 2008. 2008 年 1 月我国大范围低温雨雪冰冻灾害分析 II: 成因分析. 气象, 34(4): 101-106. Gao H, Chen L J, Jia X L, et al. 2008. Analysis of the severe cold surge, ice-snow and frozen disasters in south China during January 2008: II. Possible climatic causes. Meteor Mon, 34(4): 101-106 (in Chinese)
- 顾雷, 魏科, 黄荣辉. 2008. 2008 年 1 月我国严重低温雨雪冰冻灾害与东亚季风系统异常的关系. 气候与环境研究, 13(4): 405-418. Gu L, Wei K, Huang R H. 2008. Severe disaster of blizzard, freezing rain and low temperature in January 2008 in China and its association with the anomalies of East Asian monsoon system. Climatic Environ Res, 13(4): 405-418 (in Chinese)
- 李崇银, 顾薇. 2010. 2008 年 1 月乌拉尔阻塞高压异常活动的分析研究. 大气科学, 34(5): 865-874. Li C Y, Gu W. 2010. An analyzing study of the anomalous activity of blocking high over the Ural Mountains in January 2008. Chinese J Atmos Sci, 34(5): 865-874 (in Chinese)
- 李艳, 王式功, 金荣花等. 2012. 我国南方低温雨雪冰冻灾害期间阻塞高压异常特征分析. 高原气象, 31(1): 94-101. Li Y, Wang S G, Jin R H, et al. 2012. Abnormal characteristics of blocking high during durative low temperature, snowfall and freezing weather in southern China. Plateau Meteor, 31(1): 94-101 (in Chinese)
- 陆日宇, 黄荣辉. 1996. 关于阻塞形势演变过程中波数域能量的诊断分析. 大气科学, 20(3): 269-278. Lu R Y, Huang R H. 1996. Energetics examination of the blocking episodes in the northern hemisphere. Scientia Atmos Sinica, 20(3): 269-278 (in Chinese)
- 缪锦海. 1984. 波与波的相互作用对阻塞高压的形成、维持和衰退的影响. 气象学报, 42(1): 35-45. Miao J H. 1984. Contributions of the nonlinear interactions among waves to the formation, persistence and decay of the blocking. Acta Meteor Sinica, 42(1): 35-45 (in Chinese)
- 王东海, 柳崇健, 刘英等. 2008. 2008 年 1 月中国南方低温雨雪冰冻天气特征及其天气动力学成因的初步分析. 气象学报, 66(3): 405-422. Wang D H, Liu C J, Liu Y, et al. 2008. A preliminary analysis of features and causes of the snow storm event over the Southern China in January 2008. Acta Meteor Sinica, 66(3): 405-422 (in Chinese)
- 杨贵名, 孔期, 毛冬艳等. 2008. 2008 年初“低温雨雪冰冻”灾害天气的持续性原因分析. 气象学报, 66(5): 836-849. Yang G M, Kong Q, Mao D Y, et al. 2008. Analysis of the long-lasting cryogenic freezing rain and snow weather in the beginning of 2008. Acta Meteor Sinica, 66(5): 836-849 (in Chinese)
- 银燕, 陈久康. 1992. 阻塞高压建立、维持和崩溃机制的能量学诊断研究. 南京气象学院学报, 15(1): 72-80. Yin Y, Chen J K. 1992. A Diagnostic study on the mechanism of the foundation, maintenance and breakdown of a blocking high. J Nanjing Inst Meteor, 15(1): 72-80 (in Chinese)
- 张培忠. 1998. 夏季东亚阻塞高压形成维持的波数域动能分析. 应用气象学报, 9(3): 298-303. Zhang P Z. 1998. Kinetic energy analyses of the formation and maintenance processes of East Asian blocking high in summer. Quart J Appl Meteor, 9(3): 298-303 (in Chinese)
- 赵远冰, 梁湘三, 朱伟军. 2018. 东亚地区南北两个风暴源地中风暴的结构和动力学差异. 气象学报, 76(5): 663-679. Zhao Y B, Liang X S, Zhu W J. 2018. Differences in storm structure and internal dynamics of the two storm source regions over East Asia. Acta Meteor Sinica, 76(5): 663-679 (in Chinese)
- 赵远冰, 梁湘三. 2019. 北太平洋风暴轴“深冬抑制”现象的动力过程及其成因. 中国科学: 地球科学, 49(5): 875-894. Zhao Y B, Liang X S. 2019. Causes and underlying dynamic processes of the mid-winter suppression in the North Pacific storm track. Sci China Earth Sci, 49(5): 875-894 (in Chinese)
- Bueh C, Shi N, Xie Z W. 2011. Large-scale circulation anomalies associated with persistent low temperature over Southern China in January 2008. Atmos Sci Lett, 12(3): 273-280
- Fournier A. 2001. Wavelet-Domain nonlinear energy and enstrophy transfers between atmospheric blocks and local eddies, averaged over the NCEP Reanalysis//AGU Spring Meeting Abstracts. Washington: AGU
- Fournier A. 2002. Atmospheric energetics in the wavelet domain. Part I: Governing equations and interpretation for idealized flows. J Atmos Sci, 59(7): 1182-1197
- Fournier A. 2003. Atmospheric energetics in the wavelet domain. Part II: Time-averaged observed atmospheric blocking. J Atmos Sci, 60(2): 319-338
- Hansen A R. 1981. A diagnostic study of the spectral energetics of blocking[D]. Ames: Iowa State University.
- Hansen A R, Chen T C. 1982. A spectral energetics analysis of atmospheric blocking. Mon Wea Rev, 110(9): 1146-1165
- Hansen A R, Sutera A. 1984. A comparison of the spectral energy and enstrophy budgets of blocking versus nonblocking periods. Tellus A, 36A(1): 52-63
- Harrison D E, Robinson A R. 1978. Energy analysis of open regions of turbulent flows: Mean eddy energetics of a numerical ocean circulation experiment. Dyn Atmos Oceans, 2(2): 185-211
- Holopainen E. 1978. A Diagnostic Study of the Kinetic Energy Balance of the Long-Term Mean Flow and the Associated Transient Fluctuations in the Atmosphere. University of Helsinki, Dept. of Meteorology

- Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, et al. 1996. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. *Bull Amer Meteor Soc*, 77(3): 437-472
- Kao S K. 1968. Governing equations and spectra for atmospheric motion and transports in frequency, Wave-Number Space. *J Atmos Sci*, 25(1): 32-38
- Liang X S, Robinson A R. 2005. Localized multiscale energy and vorticity analysis: I. Fundamentals. *Dyn Atmos Oceans*, 38(3-4): 195-230
- Lorenz E N. 1955. Available potential energy and the maintenance of the general circulation. *Tellus*, 7(2): 157-167
- Liang X S, Anderson D G M. 2007. Multiscale window transform. *Multiscale Model Simul*, 6(2): 437-467
- Liang X S. 2016. Canonical transfer and multiscale energetics for primitive and quasigeostrophic atmospheres. *J Atmos Sci*, 73(11): 4439-4468
- Luo D H, Cha J, Zhong L H, et al. 2014. Anonlinear multiscale interaction model for atmospheric blocking: The eddy-blocking matching mechanism. *Quart J Roy Meteor Soc*, 140(683): 1785-1808
- Luo D H, Zhang W Q, Zhong L H, et al. 2019. A nonlinear theory of atmospheric blocking: A potential vorticity gradient view. *J Atmos Sci*, 76(8): 2399-2427
- Ma J W, Liang X S. 2017. Multiscale dynamical processes underlying the wintertime Atlantic blockings. *J Atmos Sci*, 74(11): 3815-3831
- Nath D, Chen W, Wang L, et al. 2014. Planetary wave reflection and its impact on tropospheric cold weather over Asia during January 2008. *Adv Atmos Sci*, 31(4): 851-862
- Nath D, Chen W. 2016. Impact of planetary wave reflection on tropospheric blocking over the Urals-Siberia region in January 2008. *Adv Atmos Sci*, 33(3): 309-318
- Pedlosky J. 1987. *Geophysical Fluid Dynamics*. New York: Springer-Verlag, 710 pp
- Plumb R A. 1983. A new look at the energy cycle. *J Atmos Sci*, 40(7): 1669-1688
- Saltsman B. 1957. Equations governing the energetics of the larger scales of atmospheric turbulence in the domain of wave number. *J Meteor*, 14(6): 513-523
- Strang G, Nguyen T. 1997. *Wavelets and Filter Banks*. 2nd ed. Wellesley: Wellesley-Cambridge Press, 520 pp
- Wang L, Liang X S. 2017. A diagnosis of some dynamical processes underlying a higher-latitude typhoon using the multiscale window transform. *Atmosphere*, 8(12): 118
- Xu F, Liang X S. 2017. On the generation and maintenance of the 2012/13 sudden stratospheric warming. *J Atmos Sci*, 74(10): 3209-3228
- Yang Y, Liang X S. 2019. New perspectives on the generation and maintenance of the Kuroshio large meander. *J Phys Oceanogr*, 49(8): 2095-2113
- Zhao Y B, Liang X S. 2018. On the inverse relationship between the boreal wintertime pacific jet strength and storm-track intensity. *J Climate*, 31(23): 9545-9564
- Zhou W, Chan J C L, Chen W, et al. 2009. Synoptic-scale controls of persistent low temperature and icy weather over Southern China in January 2008. *Mon Wea Rev*, 137(11): 3978-3991