

吴志彦,李宏江,赵海军,等.等熵位涡揭示的一次强寒潮过程中高层扰动特征[J].海洋气象学报,2017,37(1):84-91.  
Wu Zhiyan, Li Hongjiang, Zhao Haijun, et al. Disturbance features of mid-upper troposphere during a strong cold wave event revealed by isentropic potential vorticity analysis[J].Journal of Marine Meteorology, 2017, 37(1): 84-91. DOI: 10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2017.01.009. (in chinese)

## 等熵位涡揭示的一次强寒潮过程中高层扰动特征

吴志彦<sup>1</sup>,李宏江<sup>1</sup>,赵海军<sup>2</sup>,姚丽娜<sup>3</sup>,李旭杰<sup>1</sup>

(1. 威海市气象局,山东 威海 264200; 2. 临沂市气象局,山东 临沂 276004; 3. 常州市气象局,江苏 常州 213022)

**摘要:**采用欧洲中心提供的ERA-Interim每日4次再分析资料,对2016年1月下旬的一次强寒潮事件进行等熵位涡分析。结果表明,此次强寒潮的爆发以动力对流层顶下降、高位涡下传为特征,位涡扰动的强度和曲线的时间转折点对寒潮的酝酿和爆发有指示意义。此次强寒潮过程的冷空气可追溯到欧亚北部的新地岛附近和亚洲东北部的对流层顶,两股具有高位涡的冷空气在贝加尔湖附近合并堆积,在转竖横槽的引导下向南爆发,形成强寒潮。伴随寒潮过程的酝酿和爆发,高位涡强冷空气向下、向南传播,并伴随急流向下伸展。高位涡柱对应强烈发展并下伸的正涡度柱,表明高位涡引起的垂直拉伸导致显著的旋转增强,对应涡后横槽的强烈加深。对流层顶呈现大振幅波动,来自高层的信号较低层出现得更早、更强,在动力对流层顶上的信号比500 hPa表现得更为清楚。

**关键词:**强寒潮;等熵位涡;急流;对流层顶

**中图分类号:** P458.122 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-3599(2017)01-0084-08

**DOI:**10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2017.01.009

## Disturbance features of mid-upper troposphere during a strong cold wave event revealed by isentropic potential vorticity analysis

WU Zhiyan<sup>1</sup>, LI Hongjiang<sup>1</sup>, ZHAO Haijun<sup>2</sup>, YAO Lina<sup>3</sup>, LI Xujie<sup>1</sup>

(1. Weihai Meteorological Bureau, Weihai 264200, China; 2. Linyi Meteorological Bureau, Linyi 276004, China; 3. Changzhou Meteorological Bureau, Changzhou 213022, China)

**Abstract** By employing isentropic potential vorticity analysis, the disturbance features of mid-upper troposphere during a strong cold wave event in January 2016 are analyzed with ECMWF ERA-Interim reanalysis data. Results reveal that the out-break of the strong cold wave was characterized by dropping of the dynamical tropopause and downward extending of PV, and the disturbance of PV can be a good indicator for the brewing and out-breaking of cold wave. The cold air of the strong cold wave, which originated from the tropopause in vicinity of Novaya Zemlya in the north Eurasia and northeast of Asia, combined and accumulated nearby Lake Baikal, finally broke out southward as the cold trough transformed from transversal into upright. With the brewing and out-breaking of the strong cold wave, the cold air of high PV propagated downward and southward, with jet stream extending downward. The transversal trough intensively deepened, as the air column of high PV and cyclonic vorticity rapidly stretching downward, indicating the strengthening of cyclonic rotation as a result of vertical stretching of

收稿日期:2016-10-23; 修订日期:2017-03-02

基金项目:国家自然科学基金项目(41175092);山东省气象局青年科研基金项目(2016SDQN17);威海市科学技术发展计划项目(2014GNS014)

作者简介:吴志彦(1983—),女,硕士,工程师,主要从事海气相互作用和灾害性天气气候研究,wuzhy83@gmail.com。

high PV. The dynamic tropopause exhibited large amplitude of disturbance. The disturbance signal from the upper levels appeared earlier and stronger, and the signal in the dynamic tropopause was more pronounced than that at 500 hPa.

**Key words** strong cold wave; isentropic potential vorticity; jet stream; tropopause

## 引言

位涡与绝对涡度和静力稳定度有关,是大气动力和热力特征的综合表征。20 世纪 40 年代, Rossby<sup>[1]</sup>和 Ertel<sup>[2]</sup>先后提出了位涡和广义位涡的概念。20 世纪 80 年代, Hoskins 等<sup>[3]</sup>对等熵位涡的应用作出了系统阐述。位涡理论已成为天气动力学领域中的重要研究方法之一<sup>[4]</sup>。位涡的守恒性可用于随空间和时间跟踪重要的天气特征<sup>[5]</sup>。近年来,位涡在天气气候事件分析中得到了广泛应用。赵其庚<sup>[6-7]</sup>认为,等熵位涡图对分析大尺度天气过程有明显优点。丁一汇等<sup>[8]</sup>指出,在冬季,等熵位涡的守恒时间长,因此可以根据等熵位涡的守恒性来追踪冬季寒潮过程的重要特征。近年的研究<sup>[9]</sup>也表明,极地涡旋边缘的高等熵位涡梯度带(即斜压带),可有效地将不同性质的极区高位涡冷空气与极涡外部的低位涡暖空气分割开来。黎惠金等<sup>[10]</sup>用位涡方法对 2008 年初南方低温雨雪冰冻灾害进行诊断分析,揭示了造成该次南方雪灾的强冷空气在不同阶段有不同来源。易明建等<sup>[11]</sup>分析了 2008 年 1 月中下旬南方雪灾期间平流层的极涡变化,指出强冷空气来自极地平流层中部;平流层高位涡下传时,在 30°N 附近的对流层切断出一个高位涡中心,使南方地区出现大范围雨雪冰冻天气。对 2008 年 12 月的两次强寒潮事件的等熵位涡分析<sup>[12]</sup>也表明,寒潮爆发时高位涡向下向南传播,12 月下旬强寒潮过程中,高位涡冷空气的补充使高层冷空气向下输送涡度更大,位涡异常较 12 月上旬的寒潮过程更强。

2016 年 1 月下旬,受冷涡和横槽影响,中国出现了一次全国性强寒潮天气。西北地区东部、华北、黄淮、江淮东部、江南东部、华南南部及云南东部等地部分地区最大降温幅度达 12~18 °C,局部超过 18 °C<sup>[13]</sup>。受强寒潮影响,山东省出现了大风、降温 and 降雪天气,海上有 7~8 级阵风 9~10 级偏北大风,1 月 23 日和 24 日早晨山东大部地区最低气温在 -12~-18 °C 之间,最低气温出现在 23 日阳信站,为 -22.6 °C,共有 10 个测站日最低气温突破历史极值。该文利用等熵位涡分析方法对此次强寒潮过

程的爆发机制进行分析,以期揭示其冷空气来源和传播特征。

## 1 资料和方法

### 1.1 ERA-Interim 再分析资料

使用的资料为欧洲中期天气预报中心(ECMWF)提供的 ERA-Interim 每日 4 次再分析资料,水平分辨率为 2°×2°,包含位势高度、位涡、风、比湿、相对涡度、海平面气压、地面 2 m 气温等要素。ECMWF 将数据插值到等压面,部分数据插值到等位温面(等熵面)和 PV=2 PVU 等位涡面。

### 1.2 等熵位涡和动力对流层顶

在自由大气中,绝热运动的位涡接近守恒。绝热无摩擦大气有沿着等熵面做二维运动的趋势。位涡的属性可使其在高空动力学中用作示踪物。根据等熵位涡图可以明确地区分平流层空气和对流层空气<sup>[14]</sup>。在等熵坐标系下,位涡可表示为:

$$PV = -g(\zeta + f)_\theta \frac{\partial \theta}{\partial p} \quad (1)$$

(1)式中,PV 为等熵坐标系下的位涡; $g$  为重力加速度; $(\zeta + f)_\theta$  为根据风场计算的等熵面上绝对涡度的垂直分量,其中  $\zeta = \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y}$ ,  $f$  为地转涡度的

垂直分量;  $-\frac{\partial \theta}{\partial p}$  为垂直大气静力稳定度。(1)式表明,位涡与绝对涡度和静力稳定度两个变量有关,通常取 1 PVU = 10<sup>-6</sup> m<sup>2</sup> · K · s<sup>-1</sup> · kg<sup>-1</sup> 作为单位位涡。位涡具有守恒性和不连续分布的特征,对流层中位涡一般较小,而平流层中位涡随高度迅速增大。通常以动力对流层顶作为平流层和对流层之间的转换层。动力对流层顶下降,表示具有高位涡特征大气的侵入。一个局地下降的对流层顶称为对流层顶折叠,对流层顶折叠反映了高层锋生<sup>[15]</sup>。

在温带气旋活跃的地区,通常可由 PV 定义动力对流层顶<sup>[16]</sup>。动力对流层顶的 PV 值通常介于 1~4 PVU 之间<sup>[3,17]</sup>。国内学者指出,在副热带急流以北的地区,PV=2 PVU 等位涡面常被用作动力对流层顶<sup>[4]</sup>。因此,该文使用 PV=2 PVU 面作为动力对流层顶。

## 2 寒潮发展的位涡特征

### 2.1 动力对流层顶演变

2016年1月,山东省气温波动幅度较大,上旬偏高,受17日前后和23日前后两次冷空气影响,中、下旬气温转为持续偏低。依据冷空气划分标准,发生在中旬的冷空气过程达到中等强度,而发生在下旬的过程则达到了全国性寒潮<sup>[13]</sup>。

寒潮的酝酿,往往伴随着西伯利亚高压的强烈增幅,而寒潮爆发过程中,西伯利亚高压南下,所经之处的降温幅度也是衡量寒潮强度的指标之一。依据此次寒潮过程的动态发展和影响范围,结合已有研究,将(40~60°N, 80~120°E)范围的平均海平面气压定义为西伯利亚高压强度<sup>[8]</sup>,并取(25~40°N, 105~120°E)作为中国东部地区,分析其地面2 m平均气温和相应等位温面(等熵面)上的扰动特征。取1月15—26日时段,先对比分析两次过程动力对流层顶的变化情况。图1给出了该时段内中国东部地区等熵位涡的时间剖面图。由图可见,2016年1月中下旬,中国东部地区分别在17日前后和23日前后发生了两次较明显的高层位涡扰动,分别对应着两次冷空气活动过程。其中23日前后,代表动力对流层顶的2 PVU等位涡面下降到315 K等熵面(约为400 hPa)附近,较17日前后的冷空气过程下降到更低的高度,这也反映了23日前后的强寒潮过程较17日前后中等强度的冷空气过程强得多。PV=2 PVU的动力对流层顶高度降低,清楚地揭示

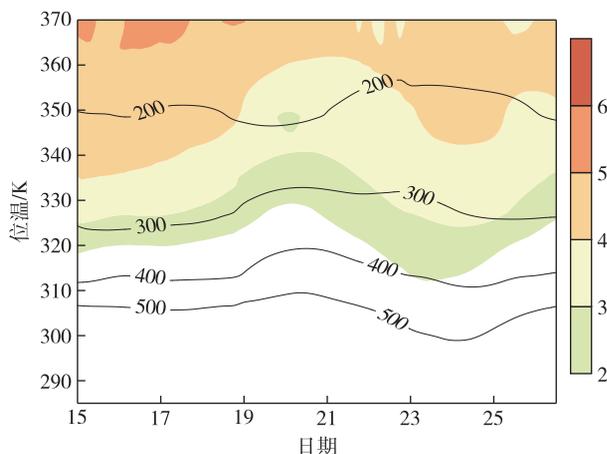


图1 2016年1月15—26日中国东部地区等熵位涡的时间剖面图(填色区为位涡,单位:PVU;黑实线为等压线,单位:hPa)

Fig.1 The time cross section of isentropic potential vorticity (shaded; unit: PVU) and pressure (contours; unit: hPa) averaged over East China from 15 to 26 Jan. 2016

了高层的动力异常。

23日前后的强寒潮过程中,315 K等熵面接近动力对流层顶的高度(图1),因此重点关注中国东部地区的315 K等熵位涡的扰动序列,如图2所示。315 K等熵位涡序列也清楚地揭示了两次冷空气活动过程(图2a),其中17日前后东部地区平均位涡为1.7 PVU左右,23日前后则达到2.5 PVU左右,而该地区1月份315 K平均等熵位涡为1.24 PVU。同时段西伯利亚高压强度和东部2 m平均气温序列表明(图2b),1月17日冷空气影响前,西伯利亚高压强度峰值约为1 037 hPa左右,而1月23日前后西伯利亚高压强烈增幅,其强度峰值达到1 055 hPa以上,较文献[8, 12]所关注的寒潮过程也高出10 hPa以上。基于Micaps的常规观测资料显示,1月21日11时,西伯利亚高压中心气压达到1 083.4 hPa。22日,强寒潮开始爆发,对比分析表明,中国东部地区2 m气温的最低值滞后西伯利亚高压强度峰值期约2 d,再次印证了这一事实:大规模的强寒潮事件往往都是随着西伯利亚高压的增幅南下而向南爆发<sup>[8]</sup>。

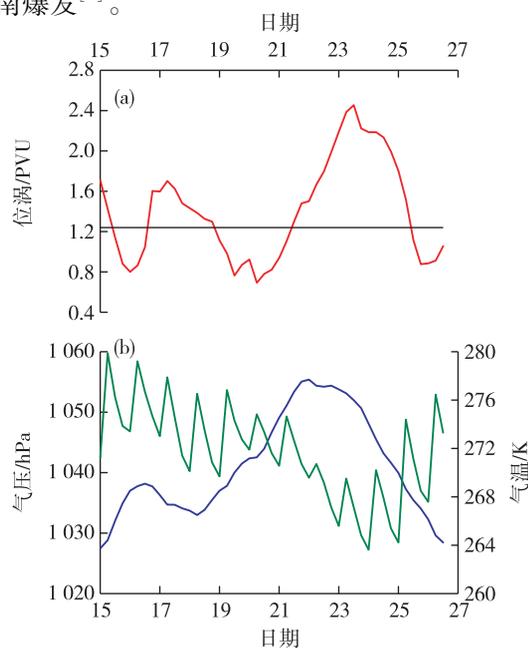


图2 中国东部地区315 K等熵位涡(a,单位:PVU)及西伯利亚高压强度和东部2 m平均气温(b,蓝色线为高压强度,单位:hPa;绿色线为平均气温,单位:K)

Fig.2 Time series of isentropic potential vorticity on isentropic surface of 315 K averaged over East China (a, unit: PVU) and Siberian high intensity (blue line; unit: hPa) with temperature at 2 m averaged over East China (green line; unit: K) (b)

从图1、图2可见,强寒潮的爆发以动力对流层顶下降、高位涡下传为特征,先后经历了西伯利亚高压强烈增幅、东部地区315 K等熵位涡显著增大、地面2 m气温显著降低的过程。可见,位涡扰动的强度和时曲线的转折点对寒潮的酝酿和爆发有指示意义。

## 2.2 315 K 等熵面位涡分析

此次强寒潮过程属于横槽转竖型。图3给出了19—23日500 hPa位势高度和315 K等熵位涡的叠加图。可见,寒潮发展演变过程先后经历了乌拉尔山高压脊发展加强和冷空气堆积,贝加尔湖附近横槽南压,以及横槽转竖、冷空气爆发阶段。

18—20日(图3a),乌拉尔山附近的长波脊不断加强向极地伸展,脊前不断加强的偏北气流使冷空气开始堆积。极涡分裂南下,在新地岛附近和亚洲东北部各有一个中心,此时中国东部地区刚经历了一次冷空气过程。从叠加的315 K等熵位涡分布可见,4 PVU以上的高位涡与两个分裂南下的极涡相对应,新地岛附近的高位涡空气在乌拉尔山脊的

北侧分裂南下,开始在贝加尔湖附近的横槽内堆积。

21日20时(图3b),亚洲东北部极涡南压,乌拉尔山高压脊也发展出一个闭合中心,与其东侧南掉的极涡形成偶极型环流。脊前横槽与亚洲东北部极涡环流结合,两股冷空气在贝加尔湖附近合并堆积,与500 hPa冷涡对应的是315 K等熵面上大片6~7 PVU的高位涡区。

22日20时(图3c),乌拉尔山附近长波脊减弱,贝加尔湖附近冷涡及其对应的大片6 PVU以上的高位涡区显著南压至中国东北—华北一带;冷涡底部有短波槽东移,横槽开始转竖。此时西伯利亚高压发展到了峰值期,地面强冷空气开始向南爆发。

23日白天(图3d),长波脊减弱西退,冷涡中心迅速东移南压至中国东北地区,横槽转竖下摆,在转竖横槽的引导下,高位涡区迅速东移南压。对应地面高压中心气压达1 082.5 hPa,此后冷空气主体自北向南入侵中国东部地区,雪线不断南压,多地先后经历了雨雪、寒潮、冰冻等天气。

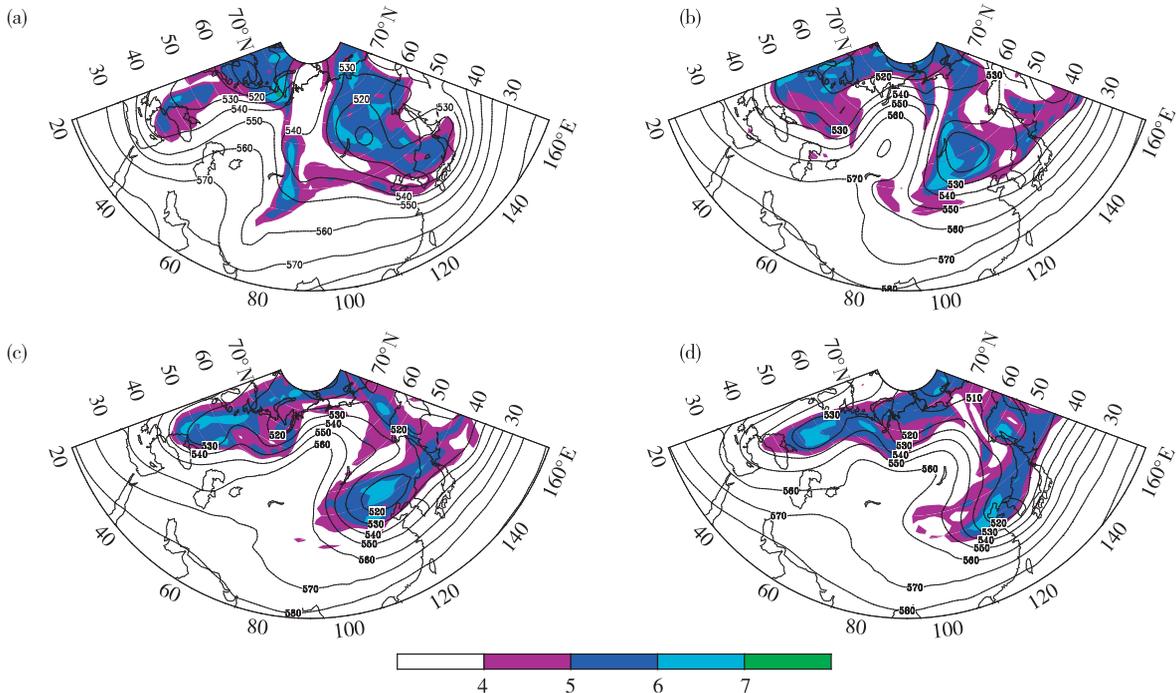


图3 寒潮演变过程500 hPa位势高度(黑实线,单位:dagpm)和315 K等熵位涡(填色区>4 PVU)叠加图(a. 19日08时, b. 21日20时, c. 22日20时, d. 23日20时)

Fig.3 Temporal evolution of geopotential height of 500 hPa (contours; unit:dagpm) and isentropic potential vorticity on isentropic surface of 315 K (shaded area >4 PVU) (a. 08:00 BST 19 Jan., b. 20:00 BST 21 Jan., c. 20:00 BST 22 Jan., d.20:00 BST 23 Jan.)

综合分析表明,造成此次强寒潮过程的强冷空气可追溯到欧亚北部的的新地岛附近和亚洲东北部

的对流层顶,两股具有高位涡的冷空气在贝加尔湖附近合并堆积,在转竖横槽的引导下向南爆发,形

成强寒潮。等熵位涡的演变反映了高层冷空气的分布及活动,高位涡与冷涡活动密切相关,通过追踪位涡异常区(位涡高值区),可以追踪冷空气的来源和传播。

### 2.3 位涡下传特征

针对此次强寒潮过程,选取冷空气在贝加尔湖

附近堆积时次(21日20时)和寒潮爆发时次(23日08时),分别过高位涡中心作剖面(图4),分析高层位涡和动力对流层顶扰动特征,以及位涡异常区下对流层的响应。

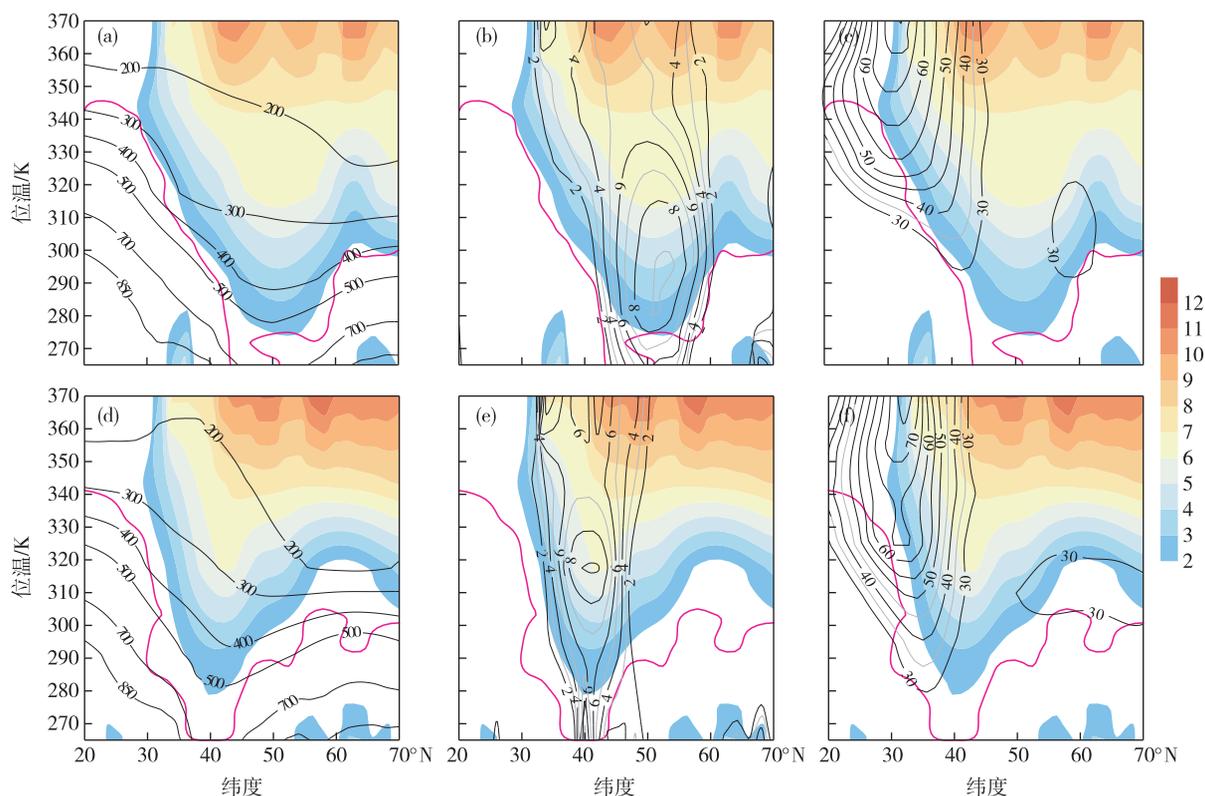


图4 过高位涡中心的纬度—等熵面剖面(a-c;21日20时过110°E剖面,d-f;23日08时过114°E剖面;填色区为 $PV > 2$  PVU的等熵位涡,紫色线为比湿 $q = 0.1 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 等值线;a和d叠加了等压线;黑实线,单位:hPa,b和e叠加了相对涡度;黑实线,单位: $10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ,c和f叠加了风速;黑实线,单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )

Fig.4 Latitude-isentropic surface section across high PV center(Along 110°E at 20:00 BST 21 Jan. (a-c) and 114°E at 08:00 BST 23 Jan. (d-f). Displayed are isentropic potential vorticity (shaded area  $> 4$  PVU) and specific humidity ( $q = 0.1 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ , purple contours), with relative vorticity in b and e (contours; unit:  $10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ) and wind speed depicted by isotachs in c and f (contours; unit:  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )

剖面分析显示,除了与平流层主体(延伸至高层)位涡大值区相连的高PV以外,对流层低层也出现了一些大于2 PVU的高PV区。Šterlak等<sup>[18]</sup>在建立对流层顶折叠的识别算法时将这些情况进行了归类,认为只有与平流层主体PV相联的高PV,才认为是平流层的。非绝热加热造成的PV异常,从动力角度考虑并不属于平流层;考虑其具有高PV和高比湿 $q$ 的特征,采用比湿阈值 $q = 0.1 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 来区分。而极区地面附近强烈辐射降温造成的高静力稳定度空气,以及大地形附近摩擦造成的PV异常,则识别为地面PV异常。因此,结合所关注的个

例,参考以上作法,对于低层出现的高PV空气,以 $q = 0.1 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的比湿阈值来区分。如图4a,d所示,平流层下伸的大于2 PVU的高PV柱,其比湿均在 $q = 0.1 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的阈值之下,因此,仅考虑与平流层主体PV相连的2 PVU面作为动力对流层顶。

21日20时(图4a),在中纬度地区,动力对流层顶呈漏斗状显著下伸至500 hPa附近,形成对流层顶折叠,造成了局地位涡异常。位涡异常区等压线稀疏,静力稳定度非常大;其下方等压线密集,静力稳定度减小。依据位涡守恒原理,静力稳定度减小,必然导致涡度增加。从图4b可见,在位涡异常

区的下方,正涡度柱明显增强并显著下伸,700 hPa ~200 hPa 为  $6 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$  以上的正涡度区,表明高位涡区的垂直拉伸导致冷空气旋转加强,对应等压面图(略)上横槽的强烈发展。强风速与下传的高位涡相伴(图 4c),在其南北两侧的强大涡梯度区形成围绕这一高位涡柱的两支急流。南侧位涡梯度显著增大并向上延伸至平流层,与其对应的南侧急流叠加在副热带急流上,在副热带地区 200 hPa 以上出现急流核,局地最大风速值在  $80 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  以上,而  $30 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  以上的强风速区在位涡异常区的两侧下传到 285 K 等熵面附近的对流层中部。

23 日 08 时(图 4d),寒潮爆发,转竖横槽引导高位涡冷空气南下。过高位涡中心的剖面显示,伴随高位涡向南传播,高位涡柱也显著收窄,动力对流层顶下伸至 500 hPa 附近。与高位涡柱相对应的正涡度柱下伸收窄,并向向下南传播,在  $40^\circ \text{N}$  附近

的对流层中下部形成强涡度柱(图 4e),对应对流层中低层旋转加强,涡后横槽的强烈加深。伴随动力对流层顶折叠,急流也向下伸展至 700 hPa 附近(图 4f)。

中国东部地区一个代表格点 ( $35^\circ \text{N}, 114^\circ \text{E}$ ) 的相对涡度的时间—高度剖面(图 5a)也显示,23 日强寒潮爆发前后对流层中高层涡度显著增强,与 17 日前后的冷空气过程相比,其垂直伸展高度更高,中心涡度值也更大。正涡度区从 100 hPa 开始增强,在 400 hPa 附近出现  $16 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$  以上的强涡度区,并在寒潮爆发前后下伸到对流层中低层,引起涡后横槽强烈加深。从位势高度距平(相对气候态)的时间—高度剖面(图 5b)来看,23 日前后 800 ~100 hPa 均为明显的位势高度负距平区,表明此次寒潮过程冷涡(横槽)十分深厚。

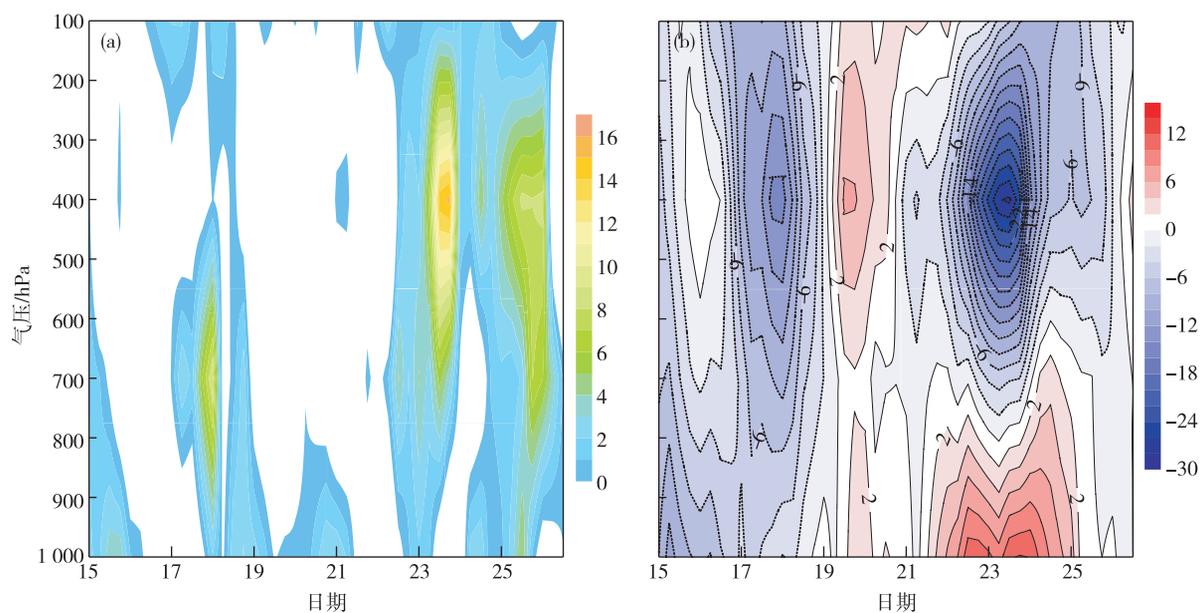


图 5 2016 年 1 月 15—26 日 ( $35^\circ \text{N}, 114^\circ \text{E}$ ) 的相对涡度 (a, 单位:  $10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ) 和位势高度距平 (b, 单位: dagpm) 的时间—高度剖面

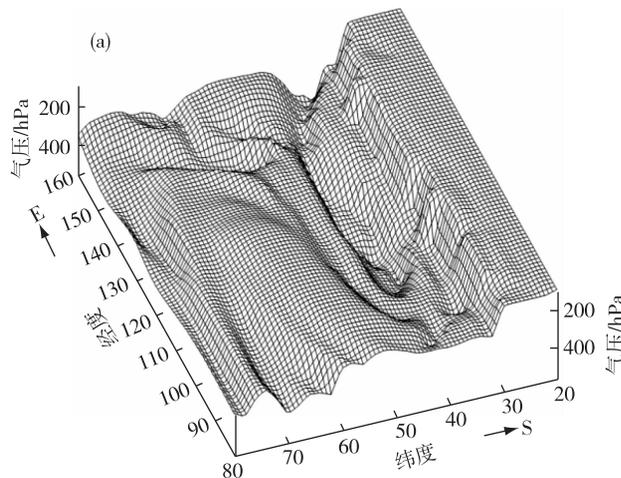
Fig.5 Time-height cross sections of relative vorticity (a, unit:  $10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ) and geopotential height anomaly (b, unit: dagpm) at  $35^\circ \text{N}, 114^\circ \text{E}$  from 15 to 26 Jan. 2016

以上动态分析显示,此次寒潮过程在对流层顶存在明显的异常信号。伴随寒潮过程的酝酿和爆发,高位涡强冷空气向下、向南传播,并伴随急流向下伸展。高位涡柱对应强烈发展并下传的正涡度柱,表明高位涡引起的垂直拉伸导致旋转显著增强。

### 3 动力对流层顶异常

位涡的属性使其可以在高空动力学中用作示踪物。如前所述,高空位涡异常表现为高纬度地区高位涡向南伸展,剖面图上表现为高位涡的下传,动力对流层顶高度降低,清楚地揭示了高层的动力异常。利用动力对流层顶高度图,是在预报实践中应用位涡观点的一个方法<sup>[5]</sup>。

图6a给出了19日08时2 PVU等位涡面(动力对流层顶)位势高度的西北方向俯视图。等位涡面的位势高度高(低)值区分别对应着反气旋(气旋)性环流。从图6a可见,在中纬度地区,动力对流层顶呈现较大振幅的波动。在 $40^{\circ}\text{N}$ 附近的东亚地区为对流层顶槽区,如前所述,对流层顶在此处下降到对流层中部,并伴随正涡度柱的下伸;而在 $30^{\circ}\text{N}$ 附近,对流层顶陡峭,对应剖面图上等熵位涡梯度



大值区和副热带急流。对比图6a和图6b发现,在寒潮发生前的乌拉尔山长波脊的发展阶段,冷空气开始在 $80^{\circ}\text{E}$ 附近的长波脊前堆积,此时500 hPa位势高度场上仅表现为一定的气旋性弯曲;而对流层顶位势高度场上已出现了闭合低值中心(一个局地下降的低对流层顶)。可见与对流层顶折叠相关的扰动,来自高层的信号较低层出现得更早、更强,在动力对流层顶的信号比500 hPa表现得更为清楚。

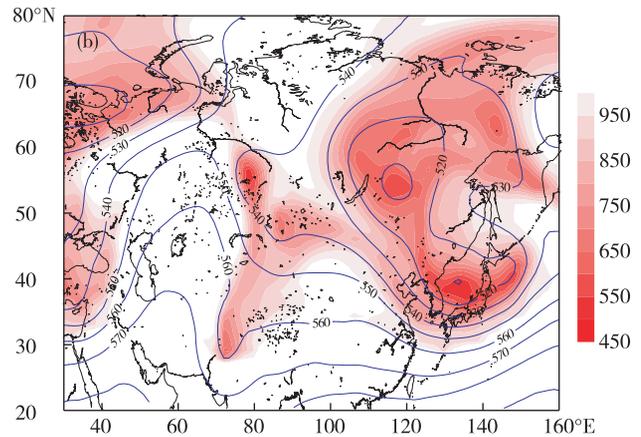


图6 2016年1月19日08时2 PVU等位涡面高度的西北方向俯视图(a,单位:hPa)和500 hPa位势高度(蓝实线,单位:dagpm)与2 PVU等位涡面位势高度(红色区,单位:dagpm)叠加(b)

Fig.6 Plan view of 2 PVU surface from the northwest (a, unit: hPa) and geopotential height (unit: dagpm) at 500 hPa (blue contours) and of 2 PVU surface (shaded in red) at 08:00 BST 19 Jan. 2016(b)

## 4 结论

1)强寒潮的爆发以动力对流层顶下降、高位涡下传为特征,位涡扰动的强度和曲线的时间转折点对寒潮的酝酿和爆发有指示意义。

2)造成这次强寒潮过程的冷空气可追溯到欧亚北部的新地岛附近和亚洲东北部的对流层顶,两股具有高位涡的冷空气在贝加尔湖附近合并堆积,在转竖横槽的引导下向南爆发,形成强寒潮。

3)伴随寒潮过程的酝酿和爆发,高位涡强冷空气向下、向南传播,并伴随急流向下伸展。剖面分析显示,高位涡区对应强烈发展并下伸的正涡度柱,表明高位涡引起的垂直拉伸导致旋转显著增强,对应涡后横槽的强烈加深。

4)此次强寒潮过程中,对流层顶呈现大振幅的波动。来自高层的信号较低层出现得更早、更强,在动力对流层顶上的信号比500 hPa表现得更为清楚。

## 参考文献:

- [1] Rossby C G. Planetary flow patterns in the atmosphere [J]. Quart J Roy Met Soc, 1940, 66(Suppl): 68-87.
- [2] Ertel H. Ein neuer hydrodynamischer wirbelsatz [J]. Meteor Z, 1942, 59: 271-281.
- [3] Hoskins B J, McIntyre M E, Robertson W A. On the use and significance of isentropic potential vorticity maps [J]. Quart J Roy Met Soc, 1985, 111(470): 877-946.
- [4] 寿绍文.位涡理论及其应用[J].气象, 2010, 36(3): 9-18.
- [5] Santuerette P, Georgiev C G. Weather analysis and forecasting-applying satellite water vapor imagery and potential vorticity analysis [M]. Burlington: Elsevier Academic Press, 2005: 1-74.
- [6] 赵其庚.侵入青藏高原冷空气过程的等熵位涡分析[J].气象, 1990, 16(6): 9-14.
- [7] 赵其庚.一次东亚寒潮过程的等熵位涡分析[J].应用气象学报, 1990, 1(4): 392-399.
- [8] 丁一汇,马晓青.2004/2005年冬季强寒潮事件的等熵位涡分析[J].气象学报, 2007, 65(5): 695-707.

- [9] 任荣彩,吴国雄,Cai M,等.平流层-对流层相互作用研究进展:等熵位涡理论的应用及青藏高原影响[J].气象学报,2014,72(5):853-868.
- [10] 黎惠金,李江南,肖辉,等.2008年初南方低温雨雪冰冻事件的等熵位涡分析[J].高原气象,2010,29(5):1196-1207.
- [11] 易明建,陈月娟,周仁君,等.2008年中国南方雪灾与平流层极涡异常的等熵位涡分析[J].高原气象,2009,28(4):880-888.
- [12] 田秀霞,寿绍文.2008年12月两次强寒潮过程的等熵位涡分析[J].气象科学,2013,33(1):102-108.
- [13] 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.
- [14] 姚秀萍,吴国雄,赵兵科,等.与梅雨锋上低涡降水相伴的干侵入研究[J].中国科学 D 辑,2007,37(3):417-428.
- [15] 寿亦萱,陆风,寿绍文,等.对流层顶折叠检测新方法及其在中纬度灾害性天气预报中的应用[J].大气科学,2014,38(6):1109-1123.
- [16] Zänagl G, Hoinka K P. The tropopause in the polar regions [J]. J Climate, 2011,24(14):3117-3139.
- [17] Kunz A, Konokpa P, Müller R. Dynamical tropopause based on dynamic potential vorticity gradients [J]. J Geophys Res: Atmos,2011,116(D01110):1-13.
- [18] Šterlak B, Sprenger M, Phahl S, et al. Tropopause fold in ERA-Interim: Global climatology and relation to extreme weather events [J]. J Geophys Res: Atmos, 2015, 120(10):4860-4877.