张潮, 谭言科, 李崇银, 等. 2019. 高低频系统相互作用对 Rossby 波破碎过程的影响 [J]. 大气科学, 43 (2): 221–232. Zhang Chao, Tan Yanke, Li Chongyin, et al. 2019. Influences of interactions between high-frequency eddies and low-frequency variabilities on the process of Rossby wave breaking [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 43 (2): 221–232, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1801.17152.

高低频系统相互作用对 Rossby 波破碎过程的影响

张潮1 谭言科2 李崇银1,3 平已川1

1 国防科技大学气象海洋学院,南京 211101

2 复旦大学大气与海洋科学系/大气科学研究院,上海 200438

3 中国科学院大气物理研究所大气科学和地球流体力学数值模拟国家重点实验室(LASG),北京 100029

摘 要 利用美国国家环境预报中心和能源部(NCEP/DOE)的逐日再分析资料(NCEP-DOE AMIP-II),对 2010 年 12 月 20 日发生在北太平洋一次典型的反气旋式波破碎(AWB)事件进行研究,分析了波破碎过程中等熵位涡场的演变特征,揭示了波破碎过程中高频扰动以及低频信号的逐日演变特征,并对 2010 年冬季 350 K 等熵面上逐日高频位涡(PV)扰动和低频变化做经验正交函数(EOF)分析,得到了其主要模态,并从等熵位涡方程出发研究了波破碎过程中位涡高、低频变化的原因。研究表明,波破碎过程中高频低 PV 空气从北太平洋西部日本附近沿东北方向向对流层上层侵入,而来自阿拉斯加湾附近的高频高 PV 空气向对流层下层侵入。高频位涡场 EOF 分解得到的前两个模态共同描述了北太平洋中纬度地区自西向东移动的天气尺度波列;低频位涡场 EOF 分解的第一模态在北太平洋呈弧形波列结构。天气尺度波在传播过程中受到低频场的平流作用逐渐偏离其传播主要模态的位置,并发生破碎,同时高频流场对高频位涡的平流可以产生低频变化,使得低频变化的空间形态向其冬季主要模态转变。

关键词 Rossby 波破碎 等熵面 位涡 高频扰动 低频变化
 文章编号 1006-9895(2019)02-0221-12
 中图分类号 P432
 文献标识码 A
 doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1801.17152

Influences of Interactions between High-Frequency Eddies and Low-Frequency Variabilities on the Process of Rossby Wave Breaking

ZHANG Chao¹, TAN Yanke², LI Chongyin^{1, 3}, and PING Yichuan¹

1 Meteorological and Oceanography College, National University of Defense Technology, Nanjing 211101

2 Department of Atmospheric and Oceanic Sciences & Institute of Atmospheric Sciences, Fudan University, Shanghai 200438

3 State Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics (LASG), Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

Abstract Based on NCEP-DOE AMIP-II (National Centers for Environmental Prediction, U.S. Department of Energy, Atmospheric Model Intercomparison Project II) daily reanalysis data, a typical case of Anticyclonic Wave Breaking (AWB) that occurred on 20 December 2010 in the North Pacific region and the characteristics of Isentropic Potential Vorticity (IPV) during this process were studied. Daily high-frequency eddies and low-frequency variabilities were investigated. In addition, research was conducted on the modes of high-frequency eddies and low-frequency variabilities through Empirical Orthogonal Function (EOF) method on 350 K isentropic surface in the winter of 2010. Budget analysis of the

收稿日期 2017-04-14; 网络预出版日期 2018-01-15

作者简介 张潮, 男, 1991年出生,博士研究生,主要从事海气相互作用方向研究。E-mail: zhangnanshui@126.com

通讯作者 谭言科, E-mail: tanyanke@fudan.edu.cn

资助项目 国家自然科学基金项目 41475070、41490640、41605051

Funded by National Natural Science Foundation of China (Grants 41475070, 41490640, 41605051)

IPV was employed to examine the low-frequency and high frequency PV anomalies associated with the primary modes of EOF. The results show that during the process of the Rossby wave breaking, low PV air parcels that emerged over the Northwest Pacific near Japan traveled to the upper troposphere, while high PV air parcels invaded lower troposphere. The first two leading modes of high-frequency PV depict a middle-latitude wave train that propagated from west to east over the North Pacific. The first leading mode of the low-frequency PV spread in the North Pacific as an arched wave train. The track of synoptic waves could be altered by the low-frequency variability, causing the waves to break eventually; meanwhile, the advection of high-frequency flows contributed to the conversion of the primary mode from high-frequency variability to low-frequency variability in the winter.

Keywords Rossby wave breaking, Isentropic surface, Potential vorticity, High-frequency eddy, Low-frequency variability

1 引言

大气运动的尺度是可分离的,如果从空间尺度 上考虑,可以将大气运动分为行星尺度运动、天气 尺度运动、中小尺度运动等;如果从时间尺度来看, 大气运动又包含高频扰动、低频变化。低频变化的 时间范围从广义讲可视为覆盖了从准双周振荡到 年代际的气候演变。大气运动又是非线性的,不同 尺度的运动通过非线性过程相互作用,使得大气运 动呈现出非常复杂的状态。

在中纬度,低频波可以从高频扰动中得到能量 并发展起来,而低频波又能通过改变大气斜压性, 激发下游的瞬变涡动(Cai and Mak, 1989; 吴国雄 等, 1994; 陆日宇和黄荣辉, 1999; 谭本馗和潘旭辉, 2002)。Kug et al. (2010)提出了"左手定则",指 出涡旋涡度通量、温度通量以及水汽通量都是优先 指向低频流左侧。Luo et al. (2014)提出 EBM

(Eddy-Blocking Matching)机制解释阻塞的发展或 者衰亡与涡旋结构相匹配。此外,研究也表明 Rossby 波破碎在高频波与低频波相互作用的过程 中有重要作用。Rossby 波破碎是指等熵面上等位涡 线在经向区域内快速不可逆的形变,主要分为两类 ——反气旋式波破碎和气旋式波破碎(Thorncroft et al., 1993; Song et al., 2011)。大量研究强调了天气尺 度波破碎过程对低频变化的影响。Benedict et al. (2004)指出了天气尺度波破碎在北大西洋涛动 (NAO)事件中起到激发、维持的作用,他们的研

究表明 NAO 正、负位相都是起源于天气尺度波。 Woollings et al. (2008)提出冬季 NAO 是对 Rossby 波破碎事件产生的高纬度阻塞事件变化的描述,即 NAO 低频变化是北大西洋上空 Rossby 波破碎事件 的结果。Song et al. (2009)采用流函数倾向方程研 究了北半球冬季太平洋—北美遥相关型(PNA)和 NAO 之间可能的联系,结果表明 PNA 和 NAO 的 反相关关系由与 PNA 相联系的 Rossby 波破碎异常 造成。Akahori and Yoden (1997) 以及 Barnes and Hartmann (2012)观察到急流经向位置与两种类型 波破碎事件有紧密联系。反气旋式波破碎有利于高 纬度急流出现,气旋式波破碎有利于低纬急流出 现,反之也成立。Liu et al. (2014)的研究还指出 了厄尔尼诺背景条件下,北太平洋 Rossby 波破碎 对平均流起到了正反馈作用。

这些工作主要集中在分析 Rossby 波破碎与大 气低频信号的相互关系上,那么 Rossby 波破碎 过程的所包含的不同尺度运动以及波破碎过程中 高、低频信号的空间分布和它们之间的相互关系是 怎样呢?高低频相互作用又如何影响 Rossby 波破 碎?本文选取了一次典型的天气尺度 Rossby 波破 碎个例,分析 Rossby 波破碎过程中大气存在的多 尺度特征,并通过 EOF 分析,得到波破碎过程中高、 低频变化的主要模态并由等熵位涡方程简要分析 了高频、低频变化对波破碎过程的影响。

2 资料与方法

本文所用再分析资料为美国国家环境预报中 心和能源部(NCEP-DOE)合作的逐日再分析资料 (Kanamitsu et al., 2002),其水平分辨率为2.5°× 2.5°。选用资料的时间范围为2010年11月1日至 2011年2月28日,共120天。采用的方法主要有 Butterworth带通滤波、Gauss低通滤波、经验正交 函数(EOF)分解、功率谱分析、小波分析(吴洪 宝和吴蕾,2005)以及等熵位涡收支分析等。

本文选取的物理量主要为等熵位涡(IPV)。等 熵位涡(Hoskins et al., 1985)具有两个显著的性 质,一是位涡守恒,即对于无摩擦绝热运动位涡是 守恒的;二是位涡分布"可逆",即位涡具有可反 演性。自 20 世纪 80 年代 Hoskins et al. (1985)提 出等熵位涡思维(IPV-thinking)以来,得到了广泛 地应用。Hoskins(2015)又进一步总结了位涡与位 涡观点的理论基础。

对于波破碎事件的识别,本文首先在等压面上 计算位涡然后线性插值到等熵面上(等位温面)(Liu et al., 2014)。从平均位温的垂直剖面图(图略)中 可以看出平均位温随高度单调递增,在对流层上层 等位温线相对较密,而对流层下层分布相对稀 疏,表明位温垂直梯度在对流层上层较大、下层较 小。350 K等熵面位于大气"中间层"(middle world) 附近,且等熵线不与地面相交(Hoskins, 1991; Song



图 1 350 K 等熵面上点(40°N, 150°W)处位涡功率谱 Fig. 1 Power spectrum of PV (Potential Vorticity) at (40°N, 150°W) on

the 350-K isentropic surface

et al., 2011), 与等压面大致平行。Strong and Magnusdottir (2008)的研究也表明 350 K 等熵面对 于表示所有纬度对流层上层的 Rossby 波破碎过程非 常有用。因此本文选取 350 K 等熵面进行分析。对多 年冬季 350 K 等熵面上的 PV (Potential Vorticity) 天 气图逐日考察之后, 根据其形变的剧烈程度和空间 尺度筛选了本次研究的波破碎个例,即发生在2010 年12月20日的AWB(Anticyclonic Wave Breaking) 个例。该时刻 350 K 等熵位涡图上可以发现位涡等 值线大面积折叠, 位涡经向梯度为负的区域大于10 个经度,因此也将这一天看作天气尺度波破碎典型 日,后文将12月20日作为波破碎日。还需说明的 是大气运动具有明显的多尺度特征。图1给出了350 K 等熵面上点(40°N, 150°W)的位涡在 2010 年 冬季的功率谱,可以看出该点的位涡有明显的多周 期特点,其周期主要有6天、16天和40天。同样, 选取其他任意点也会有类似的多周期特征。因此对 于位涡进行尺度分析是合理的。另外,对于高、低 频信号的分离,选取的时间范围是 2010 年 11 月 1 日至次年2月28日共120天。

3 Rossby 波破碎期间等熵位涡演变 特征

图 2 给出了 AWB 期间的逐日位涡天气图,波



图 2 2010 年 12 月 (a) 16 日、(b) 17 日、(c) 18 日、(d) 19 日、(e) 20 日、(f) 21 日的 350 K 等熵面上 PV 演变。等值线间隔为 1 PVU (1 PVU=10⁻⁶ km² kg⁻¹ s⁻¹)



破碎在逐日位涡天气图上有非常明显的表现。从 2010年12月16日开始(图2a),日本以东在150°E 附近原本平直的PV等值线逐渐沿着西南—东北方 向向高纬折叠,同时低PV空气向极向东移动,而 高PV空气从北太平洋东北部的高纬地区向西向赤 道侵入。在18日(图2c)之后,等PV线在北太 平洋中部40°~60°N经向梯度反转,19日(图2d) 在向高纬侵入的低PV空气内部形成一个闭合的低 位涡中心,20日(图2e)PV等值线形变达到最强, 21日(图2f)在北太平洋中部形成一个闭合低中心 和一个闭合高中心,天气尺度波破碎过程已经结 束。330K、320K等熵面上也出现类似的演变特征 (图略),表明波破碎信号不仅仅存在于对流层高 层和平流层低层,在对流层中层也同样存在。

图 3 为 AWB 期间 320 K 等熵面上垂直速度场 以及 500 hPa 温度场。可以看到破碎期间对流层中 层温度场上表现为日本以东附近天气尺度温度暖 脊向东向北发展,并同 40°N 以北存在的更大尺度 的温度脊线合并,与此同时阿拉斯加湾附近表现为 冷中心,并向西南方向伸展为冷槽。考虑到垂直速 度,可以看出温度暖脊附近存在明显上升运动,而 温度冷槽附近则为下沉运动。在对流层高层(图 4), 由于对流层中层上升运动伴随着冷却降温,因此在 阿留申群岛以南地区形成冷中心(图 4d、e),而阿 拉斯加湾附近原本的暖中心由于下沉增温,在对流 层中层温度升高。

对于本次 AWB 事件,还对 200 hPa、500 hPa 以及 850 hPa 位势高度场以及温度场的演变进行了 分析(图略),可以确定本次波破碎事件发生在对 流层中上层。在波破碎过程中,对流层中层的低 PV 空气从北太平洋西部日本附近沿东北方向向对流 层上层侵入,在这个过程中伴随着上升冷却降温, 在对流层上层形成冷中心。而来自阿拉斯加湾附近 的高 PV 空气向赤道向西侵入对流层下层,伴随着 下沉增温。

那么波破碎过程中不同时间尺度的位涡信号 是如何演变的呢?先用 Butterworth 带通滤波器对 北半球冬季 120 天时间序列进行滤波,以周期在 2.5~8 d 的分量作为高频扰动信号,再由 Gauss 低 通滤波器提取周期大于 9 d 的信号作为低频变化。 李莹和朱伟军(2009)的研究指出在样本序列较短 的情况下,利用 Butterworth 带通滤波器提取 2.5~8 d 的天气尺度瞬变波动是可取的。

首先分析高频位涡场的演变特征(图5)。2010 年12月16日(图5a)高频位涡场在北太平洋地区 呈现若干个正、负异常中心。同图2等位涡线逐日 演变相对应,在日本东侧(35°N,145°E)附近出 现一个小的负异常中心, 在阿拉斯加半岛以南 (55°N, 155°W)存在一个小的正异常中心。17日 (图 5b)上述日本东侧的负异常中心逐渐增强,并 略向北移动,而阿拉斯加半岛以南的正异常中心向 南移动,并同 16 日存在于(30°N, 180°)附近的 正异常中心合并。18日(图 5c),日本以东负异常 中心范围继续扩大,并向东向北移动;北太平洋中 部的正异常中心,分裂为南北两个,南侧正异常中 心,继续向南移动,位于(20°N,180°)附近,同 18日等位涡线分布图中相应的高位涡区域对应。19 日(图 5d)日本以东的负异常中心逐渐向东向极移 动,该过程同图2等位涡线逐渐向东北方向折叠一 致。20日(图2e),上述负异常中心移动至阿拉斯 加半岛以南,该区域是位涡经向梯度剧烈反转的区 域,而其南侧的正异常中心对应等位涡线图中的位 涡大值区。21日,波破碎之后在北太平洋中东部形 成闭合高位涡中心和闭合的低位涡中心(图 2f), 高频位涡也在相应区域形成正、负异常中心。由以 上分析可以得出结论,本次波破碎过程是同高频天 气尺度波活动对应很好,因此是一次天气尺度波的 破碎。

图 6 给出的是低频环流场的演变特征,低频变 化的空间尺度相对于高频扰动来说更大。2010年 12月16日(图6a)以40°N为界,40°N以南,沿 着 30°N 从北太平洋中部至北美西海岸存在正一负 的异常中心分布,正异常中心位于(30°N, 180°) 附近,负异常中心位于 (30°N, 130°W); 在 40°N 以北,从阿留申群岛至加拿大西海岸构成负--正的 低频波列。在整个北太平洋区域,低频变化呈现四 极对角对称分布形态。若以(40°N, 160°W)为中 心,做平行于经纬线的坐标轴,可将四个异常中心 看作是位于四个象限。分别记为异常中心 I、II、III、 IV。其中异常中心 II 和 IV 为负异常中心, I 和 III 为正异常中心。17~18日(图 6b、6c),异常中心 II 向东北移动加强,异常中心 IV 逐渐向东移动, 而异常中心 I、III 位置、强度基本不变。19~20 日 (图 6d、e),伴随着高频低 PV 空气向极向东移动 至阿留申以南地区,异常中心 II 强度逐渐加强,同 图 5 对比可以发现,该位置是高频位涡场的一个



图 3 2010 年 12 月 (a) 16 日、(b) 17 日、(c) 18 日、(d) 19 日、(e) 20 日、(f) 21 日的 320 K 等熵面上垂直速度场(阴影,单位: Pa s⁻¹; 正值 表示下沉运动;负值表示上升运动)以及 500 hPa 温度场(等值线,间隔 5 K)

Fig. 3 Vertical velocity on 320-K isentropic surface (shadings, units: Pa s⁻¹; positive indicates downward movement; negative indicates upward movement) and temperature at 500 hPa (contours, interval is 5 K) on (a) 16, (b) 17, (c) 18, (d) 19, (e) 20, (f) 21 December 2010



图 4 2010 年 12 月 (a) 16 日、(b) 17 日、(c) 18 日、(d) 19 日、(e) 20 日、(f) 21 日的 350 K 等熵面上垂直速度场(阴影,单位: Pa s⁻¹; 正值 表示下沉运动;负值表示上升运动)以及 200 hPa 温度场(等值线,间隔 5 K)

Fig. 4 Vertical velocity on 350-K isentropic surface (shadings, units: Pa s⁻¹; positive indicates downward movement; negative indicates upward movement) and temperature at 200 hPa (contours, interval is 5 K) on (a) 16, (b) 17, (c) 18, (d) 19, (e) 20, (f) 21 December 2010

负异常中心。此外,异常中心 III 分裂为两个,记 为 III-1 和 III-2,异常中心 III-1 强度逐渐减弱,III-2 强度逐渐增强。在此期间,异常中心 IV 继续东移 至北美大陆上。19~21 日,可以清楚看到原来四极

对角对称分布结构被打破,演变为自西向东的弧形 波列结构。

从以上分析可以知道,天气尺度波首先在日本 以东洋面上空形成,该位置处于南支波导和北支波



图 5 2010 年 12 月 (a) 16 日、(b) 17 日、(c) 18 日、(d) 19 日、(e) 20 日、(f) 21 日的 350 K 等熵面上高频位涡场。等值线间隔为 0.5 PVU Fig. 5 High-frequency PV on 350-K isentropic surface on (a) 16, (b) 17, (c) 18, (d) 19, (e) 20, (f) 21 December 2010. Interval of contours is 0.5 PVU



图 6 2010 年 12 月 (a) 16 日、(b) 17 日、(c) 18 日、(d) 19 日、(e) 20 日、(f) 21 日的 350 K 等熵面上低频位涡场。等值线间隔为 0.5 PVU Fig. 6 Low-frequency PV on 350-K isentropic surface on (a) 16, (b) 17, (c) 18, (d) 19, (e) 20, (f) 21 December 2010. Interval of contours is 0.5 PVU

导的汇合处(Chang and Yu, 1999),同时又是太平 洋风暴轴(朱伟军和孙照渤, 2000;丁叶风等, 2006) 入口区域,强烈的大气斜压性有利于该区域天气尺 度波的发展,天气尺度涡旋活动频繁。之后随着时 间演变天气尺度波迅速增强东移至北太平洋中部, 该位置是北太平洋双风暴轴(傅刚等, 2009)中副 热带风暴轴出口区域,大气斜压性相对大洋西侧较 弱。在这个过程中低频位涡由四极对角对称的结构 逐渐演变为波列结构。

通过同样的方法,我们也分析了 200 hPa 位势 高度场和经向风场(图略),发现在波破碎过程中, 高频扰动同样出现在日本以东区域,并随着时间演 变逐渐增强东移,在北太平洋中部天气尺度波发生 破碎,而低频要素场也表现出与低频位涡类似的演 变特征。因此可以认为,在天气尺度波破碎过程中, 高、低频系统有其固有的演变特征,并不会因为选 取不同的要素场而有明显差别。

4 位涡高、低频变化的主要模态

从上一节分析可以看出,波破碎过程同时存在 着高频特征和低频特征,那么在波破碎过程中高频 特征主要呈现哪种结构,低频特征又呈现哪种结 构?两者之间又有何种联系?本节利用位涡场进 行 EOF 分解对上述问题进行探讨。

图7为高频位涡场EOF分解得到的前两个模态 (以下简记为 EOF^h1、EOF^h2)及其振幅, EOF^h1 和 EOF^h2 解释方差分别为 9.75%、9.19%, 前两个 模态累积方差为 18.94%。第一模态 EOF^h1 (图 7a) 在北太平洋地区的分布呈正一负一正一负的波列 结构,正异常中心分别位于(35°N,150°E)附近 和(40°N, 155°W)附近, 而负异常中心位于(35°N, 180°)附近和(35°N, 120°W)附近。而 EOF^h2(图 7b) 在北太平洋中纬度地区呈正一负一正一负一正 分布,正异常中心分别位于(35°N,135°E)附近、 (40°N, 160°W)附近和(40°N, 110°W)附近, 负异常中心位于(35°N, 170°E)附近以及(40°N, 140°W)附近。可以发现 EOF^h1 和 EOF^h2 位相差为 $\pi/2$, 且 EOF^h1 超前 EOF^h2, 它们共同反映了北太 平洋地区自西向东在 30°N~50°N 纬度带内传播的 天气尺度波列(吴洪宝和吴蕾, 2005)。图 7c 给出 的是高频位涡前两个模态分别与其时间系数标准 差相乘之后再做平方和, 它反应了天气尺度波列的 振幅分布形态。从图中可以看出,该天气尺度波列 振幅最大区域位于北太平洋中部(40°N,150°W) 附近,亦即北太平洋区域风暴轴的位置所在 (Hoskins and Valdes, 1990)。由于 EOF 分解是按方 差贡献由大到小排列,因此天气尺度波活动的最显 著特征是在北太平洋西部日本附近生成后,自西向 东沿着中纬度风暴轴平均位置向东传播,在北太平 洋中部振幅达到最大。

图 8 给出了低频位涡场 EOF 分解的第一模态 (以下简记为 EOF¹1),其解释方差为 23.39%。 EOF¹1 在北太平洋中部呈波列结构,其正异常中心 位于(30°N, 180°)和(50°N, 135°W)附近,负



图 7 高频位涡场 EOF 分解的(a) 第一模态、(b) 第二模态及(c) 两模态的振幅。等值线间隔为 0.2 PVU

Fig. 7 (a) The first leading EOF mode, (2) the second leading EOF mode of high-frequency PV and (c) amplitudes of the first two leading modes. Interval of the contours is 0.2 PVU



-1.2-1.0-0.8-0.6-0.4-0.2 0.2 0.4 0.6 0.8 1.0 1.2 PVU 图 8 低频位涡场 EOF 分解的第一模态。A、B和C分别表示了低频位 涡异常所在的三个区域,等值线间隔为 0.2 PVU

Fig. 8 The first leading mode of the low-frequency PV. A, B, and C represent three regions of the low-frequency PV anomalies, respectively. Interval of contours is 0.2 PVU

异常中心位于(50°N, 180°)以及(40°N, 100°W) 附近。与图6低频位涡逐日演变图相比较,可以发 现在 19~21 日低频位涡逐渐由四极对角对称结构 演变为图8中低频位涡主要模态。需要说明的是图 6中的四极对角对称结构在EOF分解的前几个主要 模态中并不存在,因此可以认为该四极结构只是波 破碎过程中出现的一个中间过渡型,并非低频变化 的主要型。因而波破碎过程中低频变化的演变是从 一个四极对角对称的中间过渡型转变为一个弧形 波列结构的主要型。

5 非线性平流过程对波破碎的作用

由第四节中高、低频位涡主要模态与第三节中 波破碎期间高、低频的演变对比,可发现在本次波 破碎过程中,天气尺度波的传播与其主要的传播路 径并不一致,而低频变化的形态也是发生了明显的 转变。接下来本文从等熵位涡方程出发,探讨造成 波破碎过程中位涡高、低频变化的原因。

等熵面上位涡方程(Hoskins et al., 1985; Derome et al., 2001; Athanasiadis and Ambaum, 2010)可以写作如下形式:

$$\frac{\mathrm{dPV}}{\mathrm{d}t} = \frac{\partial \mathrm{PV}}{\partial t} + \mathbf{V} \cdot \nabla \mathrm{PV} = -\dot{\theta} \frac{\partial \mathrm{PV}}{\partial \theta} + \mathrm{PV} \frac{\partial \dot{\theta}}{\partial \theta} + \frac{1}{\sigma} \mathbf{k} \cdot (\frac{\partial \mathbf{V}}{\partial \theta} \times \nabla \dot{\theta} + \nabla \times \mathbf{F}) = S, \qquad (1)$$

其中, $PV \approx (\zeta + f) / \sigma$ 为 Ertel 位涡, $\zeta = k \cdot \nabla \times V$ 表 示等熵面上相对涡度, V = (u,v,0)为等熵面上水平 速度矢量, $\sigma = -g^{-1}\partial p / \partial \theta$, $\dot{\theta} = d\theta / dt$, k 为垂直 方向上单位向量, F 为摩擦力项, θ 为位温。方程 (1)表明气团位涡的改变只能通过非绝热加热作 用和摩擦作用来实现。等熵位涡方程中由于不包含 垂直平流项,因此局地位涡是通过位涡水平平流项 和位涡源、汇项达到平衡。如果把非绝热加热和摩 擦一并作为残差项,对于大尺度流来说, S 是小项, 尤其对于较短时间内位涡可以认为近似守恒, 那么 位涡的平衡主要是由非线性平流项来决定,即:

$$\frac{\partial \mathbf{PV}}{\partial t} \approx -\mathbf{V} \cdot \nabla \mathbf{PV}.$$
 (2)

任意变量 Y在时间上可以分为三个相互正交的分量 及残差之和 (Derome et al., 2001), $Y \approx \overline{Y} + Y^{l} + Y^{h}$, \overline{Y} 表示时间平均项, Y^{l} 表示低频分量项, Y^{h} 表示 高频分量项。在方程中 Y^{l} 和 Y^{h} 同前文滤波参数保 持一致,高频取 2.5~8 d,低频取 9 d 以上部分。 方程(2)的左端可以写作

$$\frac{\partial \mathbf{PV}}{\partial t} \approx \frac{\partial \mathbf{PV}^{\mathrm{l}}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{PV}^{\mathrm{h}}}{\partial t}, \qquad (3)$$

即不考虑残差项时,位涡局地变化是低频位涡倾向 项和高频位涡倾向项之和。方程(2)的右端可以 写作

 $-\boldsymbol{V}\cdot\nabla \mathbf{P}\mathbf{V}\approx-\overline{\boldsymbol{V}}\cdot\nabla\overline{\mathbf{P}\mathbf{V}}-\overline{\boldsymbol{V}}\cdot\nabla\mathbf{P}\mathbf{V}^{1}-\overline{\boldsymbol{V}}\cdot\nabla\mathbf{P}\mathbf{V}^{h}-$

$$\boldsymbol{V}^{1}\cdot\nabla\overline{\mathrm{PV}}-\boldsymbol{V}^{1}\cdot\nabla\mathrm{PV}^{1}-\boldsymbol{V}^{1}\cdot\nabla\mathrm{PV}^{\mathrm{h}}-$$

$$\boldsymbol{V}^{h} \cdot \nabla \overline{PV} - \boldsymbol{V}^{h} \cdot \nabla PV^{l} - \boldsymbol{V}^{h} \cdot \nabla PV^{h}$$
(4)

方程(4) 右端 1~9 项分别表示时间平均流对时 间平均位涡的平流、时间平均流对低频位涡的平 流、时间平均流对高频位涡的平流、低频流场对时 间平均位涡的平流、低频流场对低频位涡的平流、 低频流场对高频位涡的平流、高频流场对时间平均 位涡的平流、高频流场对低频位涡的平流、高频流 场对高频位涡的平流,依次分别记为 Adv1、Adv2、 Adv3、Adv4、Adv5、Adv6、Adv7、Adv8 和 Adv9。

由于低频主要模态呈现出明显多中心波列结 构,因此按照异常中心所在位置的不同,分三个区 域对位涡方程各项进行研究。所选区域分别为区域 A(30°N~60°N, 150°W~120°W)、区域B(35°N~ 60°N, 150°E~160°W) 和区域 C (20°N~35°N, 150°E~160°W)。方程(3)和方程(4)各项在各 个区域内计算之后求取面积平均作为该项在某一 时刻的值。图 9a 和图 9b 分别为高频位涡倾向项和 低频位涡倾向项随时间演变。从图 9a 可以看到, 17日至19日,区域A和区域C的高频位涡随时间 增大,该过程同图5高频位涡逐日演变图中位于阿 拉斯加半岛以南和(20°N, 180°)附近正异常中心 增大相对应;而区域 B 内高频位涡随时间减小则对 应图 5 位于日本以东负异常中心向东向北移动。20 日以后,区域A和区域C内有负异常中心移入,高 频位涡倾向减小;区域 B 内有正异常中心移入,高 频位涡倾向增大。图 9b 表明 19 日之前区域 A 的时 间倾向项为正,区域B的时间倾向项为负,表明区 域A内低频正异常中心和区域B内低频负异常中心 都随着时间增强,但从时间倾向项的斜率可以看 到,区域 A 内正异常中心和区域 B 内负异常中心增 强的幅度都减小; 20 日之后区域 A 和区域 B 的时 间倾向项反相增大,表明区域A内低频正异常中心 强度减小,减小的幅度逐渐增大,而区域 B 内低频 负异常中心强度也减小,减小的幅度逐渐增大。20 日之前区域C内,其低频正异常中心的强度增大,





21 日伴随着位涡时间倾向项由正到负的转变,正异 常中心的强度减小。该过程同低频位涡的逐日演变 (图 6)一致。

从方程(2)可以知道,局地位涡的变化主要 由平流作用造成,那么使得高、低频位涡倾向变化 的原因可以从方程(4)出发进行分析。Adv1为平 均流场对平均位涡的输送,其值为常数且接近于 零,因此在后文分析中 Adv1项不作考虑。

分别对图 8 中区域 A、B、C 中平流各项作功 率谱分析,得到不同平流项的显著周期(图略)。 结果表明, Adv2、Adv4、Adv5 和 Adv9 项的显著 周期在低频时间尺度内(大于9d),而Adv3、Adv6、 Adv7和Adv8项的显著周期则是存在于高频时间尺 度内(2.5~8 d)。值得注意的是 Adv2 和 Adv4,即 平均流同低频变化的相互作用,无论是平均流场对 低频位涡场的平流还是低频流场对平均位涡场的 平流,其结果都是在低频范围。同样还有 Adv3 和 Adv7 项、Adv6 和 Adv8 项,其表现为高频时间尺 度。这可以通过波与波的相互作用来解释。如以 Kh 和 K1 分别表示高频分量和低频分量的波数, 那么波 与波相互作用的波数范围可以确定为[K_h-K_l, $K_{\rm h}+K_{\rm l}$,因为尺度是可分离的,即波数可分离,当 高频波的波数显著大于低频波的波数时,那么两者 相互作用的结果就表现为高频波,如Adv6和Adv8;

如果平流项中相互作用的波动波数范围接近,那么 其相互作用的结果就表现为低频波,如 Adv9。为 了更加精确地考察波破碎期间不同平流各项的时 间频谱,采用小波分析进行研究,小波分析的母函 数选用 Morlet 小波函数。将小波分析的结果在 16~ 21 日做平均,作为波破碎期间的小波能谱。同时分 别对平流各项作信度 90%的红、白噪声标准谱,超 过标准谱即认为周期显著(魏凤英,1999;吴洪宝 和吴蕾,2005)。从区域A、B、C内平流各项在波 破碎期间的小波能谱可以看出低频平流项中 Adv2、 Adv4 和 Adv9 项都通过检验,Adv5 项未能通过检 验;高频平流项中 Adv3 和 Adv7 在 A、B、C 三个 区域内都通过检验,而对于 Adv6 和 Adv8 项,在 区域 A 内都通过检验,区域 B 内 Adv6 通过检验, 区域 C 内 Adv8 通过检验。

在第三节和第四节的分析中,天气尺度波在北 太平洋西侧日本以东地区生成之后,并没有沿着风 暴轴的位置向东传播而是在低频场的作用下向东 北方向移动,并在北太平洋中部阿留申群岛以南地 区破碎,该过程主要发生在区域 B,因此以区域 B 为例对本文波破碎个例中高、低频位涡的演变进行 说明。图 10 为区域 B 内平流各项在波破碎期间的 小波能谱。平流项中产生高频变化并且通过检验的 是 Adv3、Adv6 和 Adv7。而 Adv3 和 Adv7 项作用



图 10 区域 B 内平流各项在波破碎期间的小波能谱。黑、蓝色实线表示平流各项谱值, 红、粉色实线表示红、白噪声标准谱 Fig. 10 Wavelet spectra of the advection terms during the wave breaking over region B. The black and blue solid lines represent spectrum values of the advection terms, the red and pink lines represent red and white noise spectra, respectively

相反,并且基本抵消,因此区域 B 内使得高频位涡 变化的原因主要是 Adv6, 亦即低频流场对高频位涡 的平流作用使得天气尺度波在该区域破碎。图 11 给 出了 Adv6 在波破碎期间的空间分布。其空间分布的 尺度表现出了天气尺度的特征,另外 Adv6 正、负异 常中心的位置主要位于北太平洋中部(20°N, 180°) 附近以及阿留申群岛以南区域,同图5高频位涡演变 中关键位置一致,进一步表明 Adv6 项的作用是使得 天气尺度波在低频流场的平流作用下发生破碎。对于 Adv6 的空间分布型与高频位涡场的配置并不完全一 致,可能是因为影响高频位涡的并不只有 Adv6,其 他平流项在这个过程中也有一定作用。也对于区域 B 内通过检验的低频平流项,Adv2、Adv4 和 Adv9 来 说, Adv2 和 Adv4 作用相反, 也基本相互抵消, 因 此造成区域 B 内低频变化的原因是 Adv9, 即高频流 场对高频位涡的平流,产生了更长时间尺度的变化, 并使得低频变化的形态发生改变。

6 结论与讨论

本文对发生在 2010 年 12 月 20 日的一次 AWB

进行了研究,分析该波破碎事件中等熵位涡场、高 度场以及温度场的演变,对波破碎过程中不同时间 尺度的信号进行了分离,逐日考察了波破碎前后高 频天气尺度扰动信号和低频信号的演变,采用 EOF 分解对 2010 年冬季高频信号和低频信号的空间模 态进行了分析。并通过等熵位涡方程对波破碎过程 中位涡高、低频变化的原因进行了探讨。得到了以 下几点结论:

(1) 在波破碎过程中, 对流层中层的高频低 PV 空气从北太平洋西部日本附近沿东北方向向对流 层上层侵入, 在这个过程中伴随着上升冷却降温, 在对流层上层形成冷中心。而来自阿拉斯加湾附近 的高 PV 空气向赤道向西侵入对流层下层, 伴随着 下沉增温。

(2)波破碎过程中等熵位涡场的分析结果表明,高频天气尺度信号首先出现在北太平洋风暴轴入口区域,同南北两支波导在北太平洋西岸汇合位置接近,并东传至北太平洋中部日界线附近,之后高频扰动的负异常中心逐渐向东向北移动,同等熵位涡场上等位涡线的形变相一致,进一步表明此次



图 11 2010 年 12 月 (a) 16 日、(b) 17 日、(c) 18 日、(d) 19 日、(e) 20 日、(f) 21 日的低频流场对高频位涡的平流项 (Adv6)。单位: PVU d⁻¹ Fig. 11 Advection term from low-frequency flow to high-frequency PV (Adv6) on (a) 16, (b) 17, (c) 18, (d) 19, (e) 20, (f) 21 December 2010. Units: PVU d⁻¹

波破碎过程是天气尺度波的破碎。在这个过程中低 频位涡在波破碎之前表现为北太平洋上四极对角 对称结构,其后逐渐演变为一个弧形波列结构。

(3)高频位涡场进行 EOF 分解得到的前两个 模态 EOF^h1 和 EOF^h2,共同描述了北太平洋 30°N~ 50°N 纬度带内自西向东传播的天气尺度波列。低频 位涡场第一模态在北太平洋中部呈弧形波列结构。 另外由位涡方程的分析可知,天气尺度波破碎的主 要原因是低频流场对高频位涡的平流作用,天气尺 度瞬变扰动首先从风暴轴入口区域即日本以东附 近生成,在中纬度沿着北太平洋地区风暴轴路径向 东传播至日界线附近,在低频场的非线性平流作用 下,偏离其平均位置逐渐向东北方向移动,使得波 发生破碎;同时高频自身的平流作用产生了低频变 化,使得波破碎过程中低频变化由四极对角对称结 构向其主要模态的弧形波列结构转变。

本文在假定不考虑摩擦和非绝热加热的条件 下,讨论了非线性平流项在不同时间尺度位涡倾向 中的作用,但对于实际大气来说,位涡的变化不是 完全意义上的守恒,非绝热加热作用、不同等熵面 的相互作用以及其他一些非线性过程仍然会影响 所研究等熵面上的位涡变化。此外,我们还需要注 意不同时间尺度的运动通过非线性平流作用影响 高、低频位涡的演变可能还需注意平流项同位涡倾 向之间的频率匹配。对于低频位涡倾向,如果平流 项的显著周期同低频位涡倾向的显著周期接近,那 么其对低频位涡倾向的影响就相对重要;如果两者 显著周期差别较大,那么平流项对低频位涡的影响 也是有限的。

参考文献(References)

- Akahori K, Yoden S. 1997. Zonal flow vacillation and bimodality of baroclinic eddy life cycles in a simple global circulation model [J]. J. Atmos. Sci., 54 (19): 2349–2361, doi:10.1175/1520-0469(1997)054< 2349:ZFVABO>2.0.CO;2.
- Athanasiadis P J, Ambaum M H P. 2010. Do high-frequency eddies contribute to low-frequency teleconnection tendencies? [J]. J. Atmos. Sci., 67 (2): 419–433, doi:10.1175/2009JAS3153.1.
- Barnes E A, Hartmann D L. 2012. Detection of Rossby wave breaking and its response to shifts of the midlatitude jet with climate change [J]. J. Geophys. Res., 117 (D9): D09117, doi:10.1029/2012JD017469.
- Benedict J J, Lee S, Feldstein S B. 2004. Synoptic view of the North Atlantic oscillation [J]. J. Atmos. Sci., 61 (2): 121–144, doi:10.1175/ 1520-0469(2004)061<0121:SVOTNA>2.0.CO;2.

- Cai M, Mak M. 1989. Symbiotic relation between planetary and synopticscale waves [J]. J. Atmos. Sci., 47 (24): 2953–2968, doi:10.1175/1520-0469(1990)047<2953:SRBPAS>2.0.CO;2.
- Chang E K M, Yu D B. 1999. Characteristics of wave packets in the upper troposphere. Part I: Northern Hemisphere winter [J]. J. Atmos. Sci., 56 (11): 1708–1728, doi:10.1175/1520-0469(1999)056<1708:COWPIT>2.0. CO;2.
- Derome J, Brunet G, Wang Y H. 2001. On the potential vorticity balance on an isentropic surface during normal and anomalous winters [J]. Mon. Wea. Rev., 129 (5): 1208–1220, doi:10.1175/1520-0493(2001)129<1208: OTPVBO>2.0.CO;2.
- 丁叶风, 任雪娟, 韩博. 2006. 北太平洋风暴轴的气候特征及其变化的 初步研究 [J]. 气象科学, 26 (3): 237–243. Ding Yefeng, Ren Xuejuan, Han Bo. 2006. Primiary analysis of the climatic characteristics and variability of the North Pacific storm track [J]. Scientia Meteorologica Sinica (in Chinese), 26 (3): 237–243, doi:10.3969/j.issn.1009-0827.2006. 03.001.
- 傅刚,毕玮,郭敬天. 2009. 北太平洋风暴轴的三维空间结构 [J]. 气象 学报, 67 (2): 189–200. Fu Gang, Bi Wei, Guo Jingtian. 2009. Three-dimensional structure of storm track over the North Pacific [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 67 (2): 189–200, doi:10.3321/j. issn:0577-6619.2009.02.002.
- Hoskins B. 2015. Potential vorticity and the PV perspective [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 32 (1): 2–9, doi:10.1007/s00376-014-0007-8.
- Hoskins B J, Mcintyre M E, Robertson A W. 1985. On the use and significance of isentropic potential vorticity maps [J]. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 111 (470): 877–946, doi:10.1002/qj.49711147002.
- Hoskins B J. 1991. Towards a PV-θ view of the general circulation [J]. Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography, 43 (4): 27–36, doi:10.3402/tellusa.v43i4.11936.
- Hoskins B J, Valdes P J. 1990. On the existence of storm-tracks [J]. J. Atmos. Sci., 47 (15): 1854–1864, doi:10.1175/1520-0469(1990)047<1854: OTEOST>2.0.CO;2.
- Kanamitsu M, Ebisuzaki W, Woollen J, et al. 2002. NCEP–DOE AMIP-II reanalysis (R-2) [J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 83 (11): 1631–1644, doi:10.1175/BAMS-83-11-1631.
- Kug J, Jin F F, Park J, et al. 2010. A general rule for synoptic-eddy feedback onto low-frequency flow [J]. Climate Dyn., 35 (6): 1011–1026, doi:10.1007/s00382-009-0606-8.
- 李莹, 朱伟军. 2009. 不同数字滤波方法在风暴轴研究中的性能比较 [J]. 大气科学学报, 32 (4): 565-573. Li Ying, Zhu Weijun. 2009. Performance of different digital filters in storm track study [J]. Transactions of Atmospheric Sciences (in Chinese), 32 (4): 565-573, doi:10.3969/j.issn.1674-7097.2009.04.014.
- Liu C J, Ren X J, Yang X Q. 2014. Mean flow-storm track relationship and Rossby wave breaking in two types of El-Niño [J]. Adv. Atmos. Sci., 31 (1): 197–210, doi:10.1007/s00376-013-2297-7.
- 陆日宇,黄荣辉. 1999. 夏季西风带定常扰动对东北亚阻塞高压的影响
 [J]. 大气科学, 23 (5): 533–542. Lu R Y, Huang R H. 1999. Influence of the stationary disturbance in the westerlies on the blocking highs over

the northeastern Asia in summer [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 23 (5): 533–542, doi:10.3878/j.issn.1006-9895. 1999.05.03.

- Luo D H, Cha J, Zhong L H, et al. 2014. A nonlinear multiscale interaction model for atmospheric blocking: The eddy-blocking matching mechanism [J]. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 140 (683): 1785–1808, doi:10.1002/ gj.2337.
- Song J, Li C Y, Zhou W, et al. 2009. The linkage between the Pacific–North American teleconnection pattern and the North Atlantic oscillation [J]. Adv. Atmos. Sci., 26 (2): 229–239, doi:10.1007/s00376-009-0229-3.
- Song J, Li C Y, Pan J, et al. 2011. Climatology of anticyclonic and cyclonic rossby wave breaking on the dynamical tropopause in the Southern Hemisphere [J]. J. Climate, 24 (4): 1239–1251, doi:10.1175/ 2010JCLI3157.1.
- Strong C, Magnusdottir G. 2008. Tropospheric Rossby wave breaking and the NAO/NAM [J]. J. Atmos. Sci., 65 (9): 2861–2876, doi:10.1175/ 2008JAS2632.1.
- 谭本馗,潘旭辉. 2002. 1998 年夏季北半球斜压波活动与长江流域洪涝 灾害分析 [J]. 南京大学学报 (自然科学版), 38 (3): 354–364. Tan Benkui, Pan Xuhui. 2002. Baroclinic waves of Northern Hemisphere and Yangtze River flood in the summer of 1998 [J]. Journal of Nanjing University (Natural Sciences) (in Chinese), 38 (3): 354–364, doi:10.3321/ j.issn:0469-5097.2002.03.010.
- Thorncroft C D, Hoskins B J, Mcintyre M E. 1993. Two paradigms of baroclinic-wave life-cycle behaviour [J]. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 119 (509): 17–55, doi:10.1002/qj.49711950903.
- 魏凤英. 1999. 现代气候统计诊断与预测技术 [M]. 北京: 气象出版社, 276pp. Wei Fengying. 1999. Modern Climatic Statistical Diagnosis and Prediction Technology (in Chinese). [M]. Beijing: China Meteorological Press, 276pp.
- Woollings T, Hoskins B J, Blackburn M, et al. 2008. A new Rossby wave-breaking interpretation of the North Atlantic oscillation [J]. J. Atmos. Sci., 65 (2): 609–626, doi:10.1175/2007JAS2347.1.
- 吴国雄, 刘辉, 陈飞, 等. 1994. 时变涡动输送和阻高形成——1980 年夏 中国的持续异常天气 [J]. 气象学报, 52 (3): 308-320. Wu G X, Liu H, Chen F, et al. 1994. Transient eddy transfer and formation of blocking high—On the persistently abnormal weather in the summer of 1980 [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 52 (3): 308–320, doi:10.11676/ qxxb1994.039.
- 吴洪宝, 吴蕾. 2005. 气候变率诊断和预测方法 [M]. 北京: 气象出版社, 371pp. Wu Hongbao, Wu Lei. 2005. Methods for Diagnosing and Forecasting Climate Variability (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 371pp.
- 朱伟军,孙照渤. 2000. 冬季北太平洋风暴轴的年际变化及其与 500 hPa 高度以及热带和北太平洋海温的联系 [J]. 气象学报, 58 (3): 309–320. Zhu Weijun, Sun Zhaobo. 2000. Interannual variability of northern winter Pacific storm track and its association with 500 hPa height and tropical and northern Pacific sea surface temperature [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 58 (3): 309–320, doi:10.3321/j.issn:0577-6619.2000. 03.006.