

冬春季动量下传引发浙江沿海灾害大风过程分析

杨亦萍¹, 史珩瑜², 刘力源³, 王丽娟¹

(1. 浙江省台州市气象局, 浙江 台州 318000; 2. 浙江省预警信息发布中心, 浙江 杭州 310002; 3. 浙江仙居县气象局, 浙江 仙居 317300)

摘 要: 对浙江沿海一次灾害性大风过程的成因进行分析, 并通过相似个例分析, 研究了此类突发大风的共性, 提出了浙江冬春季动量下传引起的爆发性大风的基本天气模型。结果表明: 深厚的强垂直风切变、显著的垂直速度和高低空温度平流的快速更替是造成本次大风的主要原因; 另外, 高低空辐合辐散场耦合配合冷空气挟卷, 促进强对流云团中下沉负浮力增强, 有助于强的动量下传引发突发大风。这类大风的天气模型特征为: 在冬春多股冷空气活跃时, 强冷中心维持, 东北亚中高纬呈“一槽一脊”型, 高空槽等压线密集; 当高空槽快速转竖时, 槽底可达30°N及其以南, 同时配合中心风速达46 m/s以上的高空急流、强度达26 m/s以上的垂直风切变和显著的高低空温度差动平流。

关键词: 动量下传; 急流; 冷空气; 大风

中图分类号: P732.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0239(2022)03-0066-09

1 引言

动量下传大风一般出现在冬春季, 通常是在冷空气南下后, 高空转偏北风控制。这类天气形势下浙江往往多为晴好天气, 所以突发大风的可预报性差, 灾害性强, 是浙江冬春海上灾害大风预报的一个难点。前人对此也展开一些研究, 孙建明等^[1]认为高低层温度差动效应可作为大风预报的定量指示; 曹美兰等^[2-3]研究发现“晴天暴”大风是在西北急流下, 急性型干冷锋快速东移南压, 斜压不稳定大气位能向动能的剧烈转换造成的; 王雷等^[4-7]研究发现高低空较强冷平流和中低空辐合辐散环流引起的动力强迫下沉作用是造成强风的重要原因; 吴海英等^[8]对冷空气引发江苏近海强风分析发现温度平流和地面风场之间相互关联, 冷平流增强了地面变压场及变压梯度是产生大风的重要原因; 周后福等^[9]从精细化观测安徽一次局地极端大风中发现, 近地层的垂直风切变、降水粒子拖曳作用和近地层

冷池密度流都是极端大风的重要成因; 张琳娜等^[10-11]研究发现中层动量和动能下传以及近地面动量和动能水平输送是影响地面大风的重要因素, 平均流和阵风在动量传送上起相当大的作用。数值预报对极端性和突发性大风的预报效果往往不佳, 也是预报的一个难点。

2020年4月12日傍晚到夜里, 浙江北部及沿海地区有一次致灾性大风过程, 出现9~11级偏北大风, 部分海域阵风达11~13级, 最大风力为40.8 m/s, 强度堪比台风级。此次强风过程自起风到出现极大风, 时间短, 突发性强, 实况风力远超预期, 造成了舟山海域渔船倾覆和多名船员死亡的重大海损事故。此类型冬春季突发性大风在浙江沿海地区比较少见, 对其系统性的研究并不多。本文对此次突发性灾害大风过程做重点分析, 主要分析实况演变、天气形势变化和致灾原因; 对比分析多个典型的相似个例, 从形势场要素分析量化, 并提出一个浙北高空冷涡底动量下传大风的预报模型, 为此类

收稿日期: 2020-12-31; 修回日期: 2021-10-13。

基金项目: 浙江省气象科技计划项目(2018QN16)。

通讯作者: 杨亦萍(1990-), 女, 工程师, 硕士, 主要从事海洋预报和气象服务工作。E-mail: ciei516@mail.ustc.edu.cn

过程提供一定的预报参考,这对今后预报和防灾减灾工作有重要意义。

2 4月12日灾害性大风过程分析

2.1 数据资料和演变过程

本文所用数据资料包括:美国国家环境预报中心(National Centers for Environmental Prediction, NCEP)逐6h的全球分析资料(Final Operational Global Analysis);MICAPS(Meteorology Information Comprehensive Analysis Process System)常规形势场、探空和物理量实况资料;浙江省常规气象观测实况资料;美国怀俄明大学(University of Wyoming)历史探空数据。

2020年4月12日下午高空冷涡南压触发对流,回波自江苏北部南压发展,江苏出现8~9级大风,18时(北京时,下同)前后对流靠近江浙沪交界,强度继续增强;18—23时是本次强雷暴大风的最强时

段(见图1),强回波东移入海增强,浙北及其沿海地区风力迅速增强,出现11~13级阵风,浙江大风过程持续近3h,由于水汽条件差,过程降水偏弱,但灾害性大风显著,下文对本次强大风过程具体分析。

2.2 天气过程形势分析

从环流型势上看,4月11日20时500 hPa中高纬贝加尔湖附近暖脊发展(见图2a),华北有横槽,江淮为偏西气流控制,温度脊略落后于高度脊,脊前有冷平流补充,有利于横槽向南加深。12日08时横槽快速转竖(见图2b),槽底加深到福建中南部,冷涡中心南压到朝鲜半岛,高空转西北急流控制,浙江北部处于急流轴左侧,有一定的高空辐散条件;槽底疏散槽,有利冷涡快速南掉,冷涡中心南压到30°~35°N。高空槽的形状及强度对于预报动量下传大风具有较大的意义^[12],而本次致灾大风发生在横槽快速转竖冷涡南掉期间。

从低层到地面形势场看,过程前1d(11日20

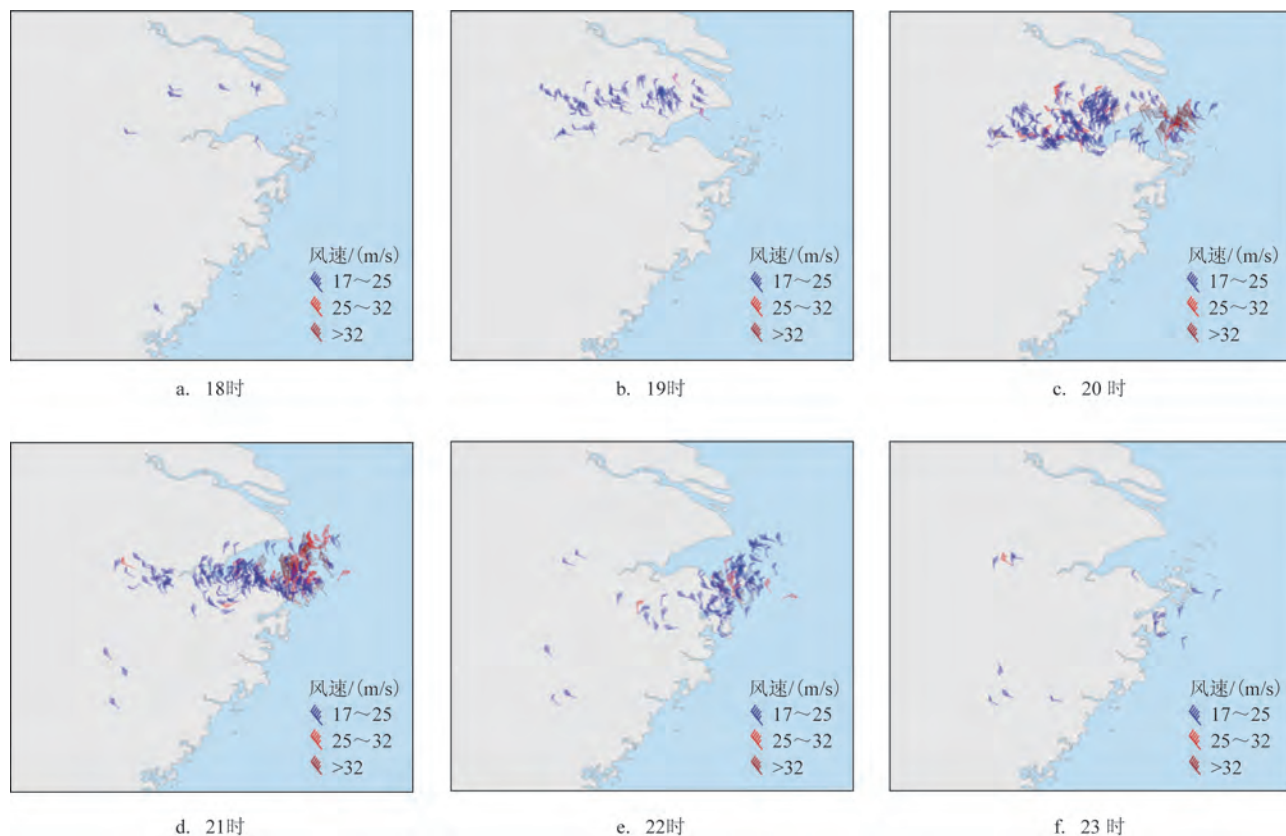


图1 2020年4月12日灾害大风过程的演变

Fig.1 The evolution of the disastrous gale on April 12, 2020

时)冷锋已南压到浙南福建一带,冷空气主体已南下,地面冷高压控制,天况转好。但当天下午到夜里低层冷平流转为弱暖平流(见图3),高空冷平流维持,呈上冷下暖结构,层结不稳定性加强。另外,通常冷空气主体过后,大气层水汽条件都较差,对流不易发展,但水汽分析发现12日08—20时,冷空气从东路经渤海往西南方南下扩散,裹挟海上水汽,给华东沿海带来的一定水汽,低层湿度转好(见

图4),低层湿度突增加大不稳定,有利于本次灾害性大风产生。

2.3 灾害性大风成因分析

2.3.1 深厚的垂直风切变

从4月12日08时杭州站探空图可知(见图5),探空曲线呈上干下湿的喇叭口形状,湿区集中在700 hPa以下;0~6 km垂直风切变为23 m/s,达强垂

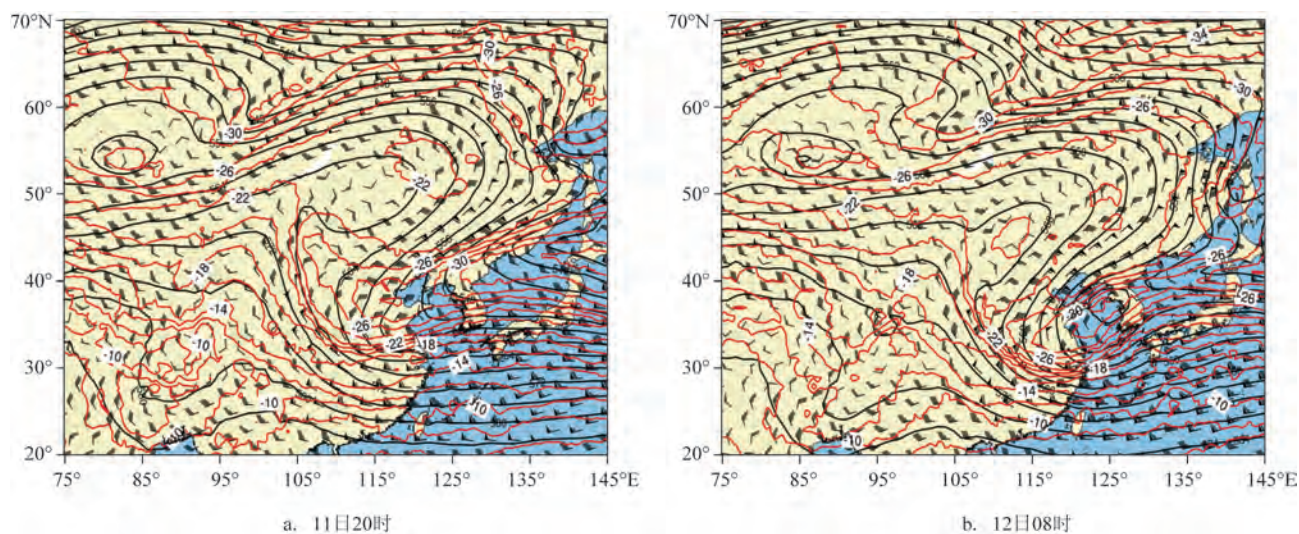


图2 2020年4月11—12日500 hPa高空形势场(黑:等高线,红:等温线)

Fig.2 The synoptic situation from April 11 to 12, 2020 at 500 hPa (Black line: contour; red line: isotherm)

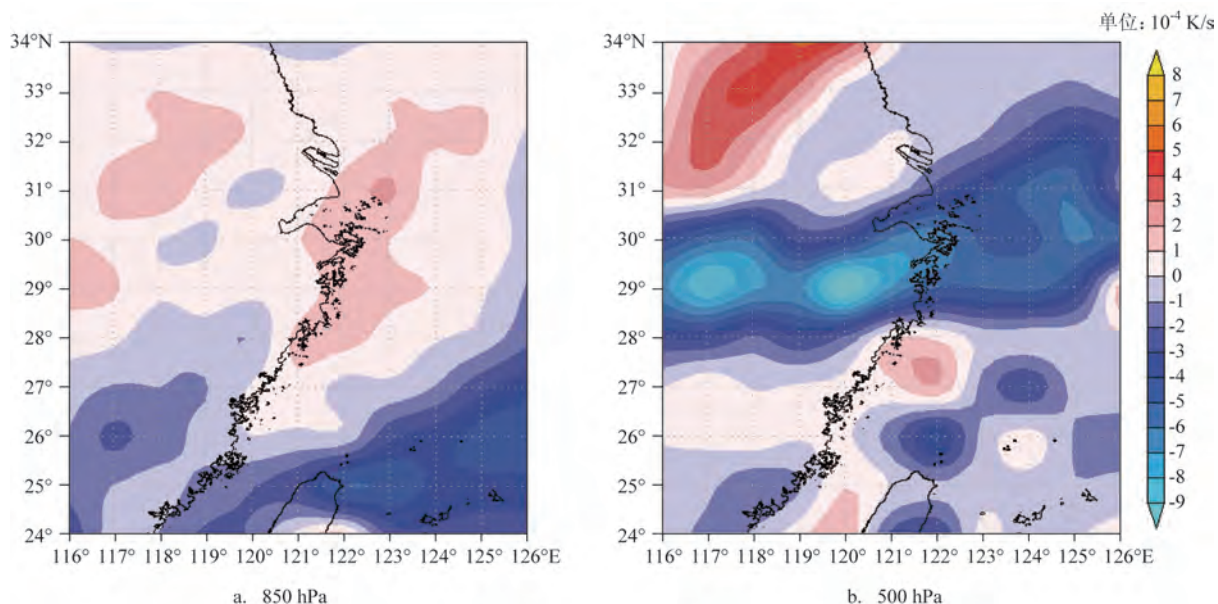


图3 4月12日下午14时高低空温度平流场

Fig.3 The temperature advection field at 14:00 on April 12

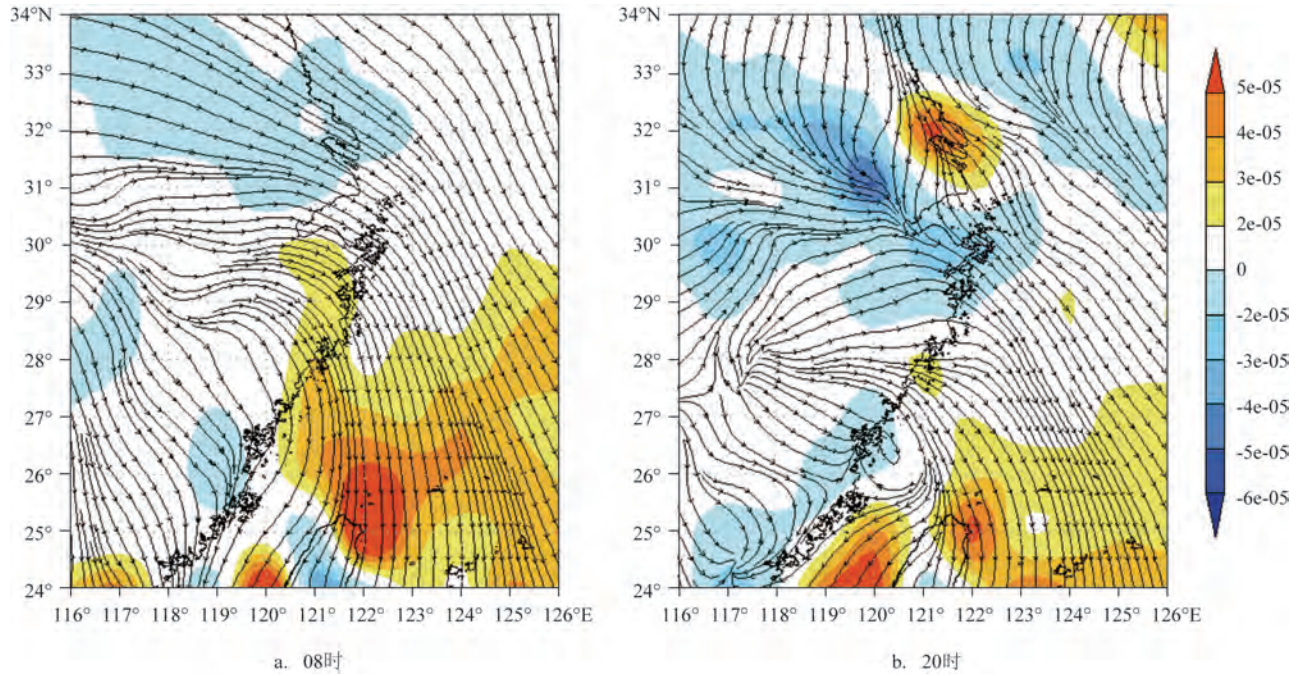


图4 4月12日浙北低层水汽通量散度(矢量为1 000 hPa流场,填色图为1 000 hPa水汽通量散度)

Fig.4 The low-altitude water vapor flux divergence in northern Zhejiang on April 12 (The vector is flow field at 1 000 hPa, and the shadow is water vapor flux divergence at 1 000 hPa)

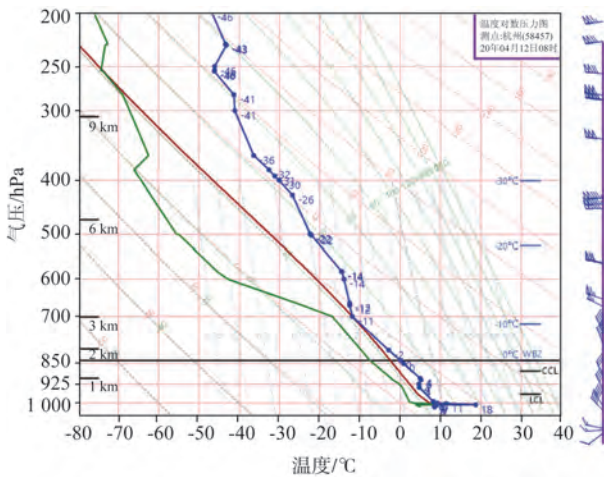


图5 杭州站4月12日08时探空图

Fig.5 Sounding figure of Hangzhou station at 8:00 on April 12

直风切变,到20时对流发展,强垂直风切变维持。从探空相对风暴螺旋度(Storm-Relative Helicity, SRH)指数来看,一般当SRH>120时,发生强对流可能性极大,而20时杭州站探空SRH值达383,此过程具备强垂直不稳定层结,低层有浅薄湿区,深厚的垂直不稳定条件,有利于对流性大风天气发生。

2.3.2 显著的下沉运动

从高空垂直分布时序图可知(见图6),杭州站200 hPa高度12日08时风速为48 m/s,而中低层700~925 hPa风速只有14~17 m/s,到20时200~500 hPa风速减小,而中低层到地面速度快速增大。高层速度减小,中低层增大,高低空动能发生快速转换,会引起高空动量向下传递。

高空涡度平流变化是大风发展的重要的动力因子^[13],而本次过程的涡度平流随高度变化也有所体现,20时浙北地区(29.8°~30.5°N)500 hPa转为负涡度平流,850 hPa以下为弱的正涡度平流(见图7)。 ω 方程^[14]中:

$$\left(\sigma \nabla^2 + f^2 \frac{\partial^2}{\partial p^2} \right) \omega = f \frac{\partial}{\partial p} [\mathbf{V}_g \cdot \nabla (f + \xi_g)] +$$

$$\nabla^2 (\mathbf{V}_g \cdot \nabla \alpha) - \frac{R}{c_p p} \nabla^2 \frac{dQ}{dt}$$

式中,右端第一项为涡度平流随高度变化项,当涡度平流随高度减小时, $\frac{\partial}{\partial p} [-\mathbf{V}_g \cdot \nabla (f + \xi_g)] > 0$,有下沉运动($\omega > 0$)。在此过程中该区出现下沉运动。

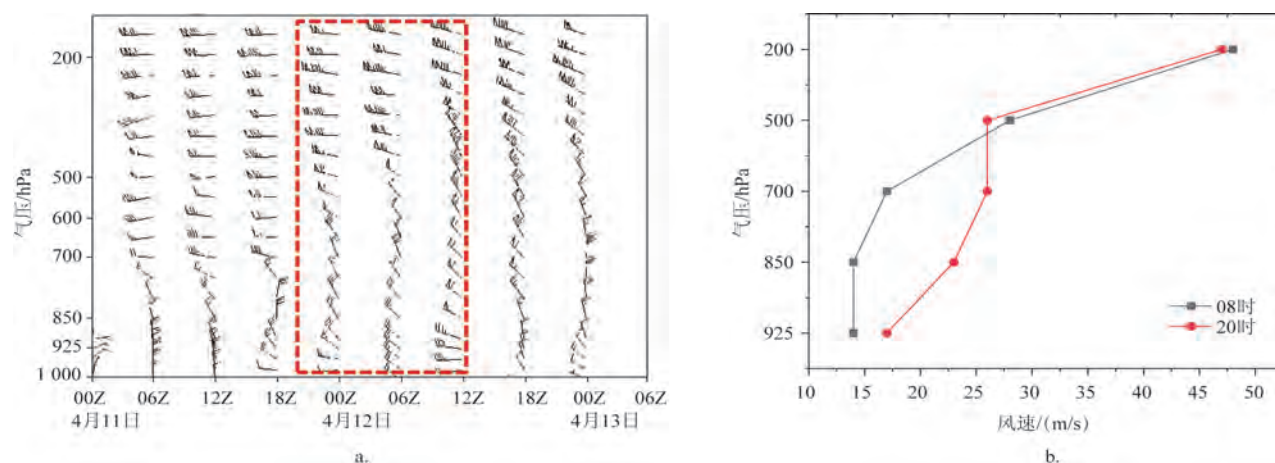


图6 杭州站4月11日08时—13日08时垂直风场时序图(a)和4月12日08—20时200~925 hPa风速变化(b)

Fig.6 Sequence diagram of vertical wind field at Hangzhou Station from 8:00 on April 11 to 8:00 on April 13 (a) and variation of wind speed from 200 to 925 hPa at Hangzhou station from 8:00 to 20:00 on April 12 (b)

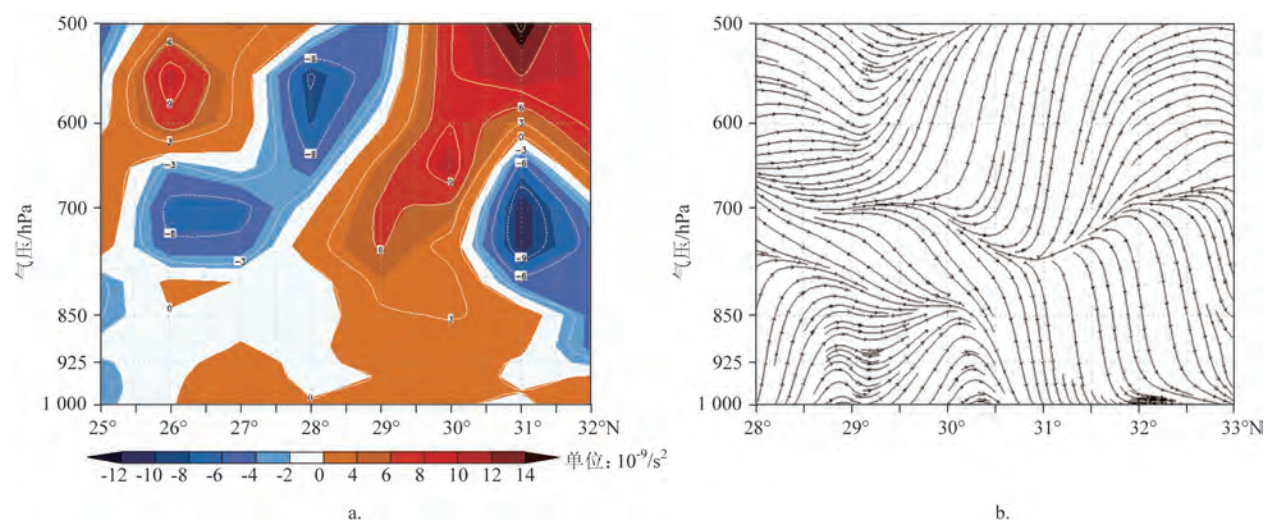


图7 12日20时沿121.5°E涡度平流剖面(a)和流场剖面(b)

Fig.7 Profile of vorticity advection (a) and flow field (b) along 121.5°E at 20:00 on April 12

另外,从121.5°E的流场剖面图上也可以看到20时浙北700 hPa到地面有明显的下沉运动。

2.3.3 高低空温度平流的快速更替

本次过程中一个显著特征就是温度平流快速置换,而温度平流的快速变化也可能是大风形成的一个重要原因^[1]。分析温度平流垂直剖面可知(见图8),4月12日08时浙北(30°N)上游500 hPa上有显著冷平流,而对应低层850 hPa为暖平流,整层为偏北风,上冷下暖的温度平流使其存在明显的高低空温度差动平流。

大风发生当晚高空500 hPa偏北风使冷平流不

断向下扩散,高空强锋区伴随下沉运动往下传递,中层冷平流加强,出现明显的温度锋增压,850 hPa暖平流减弱并逐渐被冷平流取代,低层出现一个显著的冷暖平流中心对,锋区下沉,地面气压快速增大,使地面风速猛增,这种强烈的温度平流更替非常有利于大风产生。

2.3.4 高低空耦合与冷空气挟卷相互作用

本次过程高空呈后倾槽结构,强风发生当日08时,苏南到浙北高空为辐散场,低层为弱辐合场,弱天气强迫触发对流。随着高空槽转竖东移,对流回波发展加强,到20时低层辐合和高空辐散的耦合结

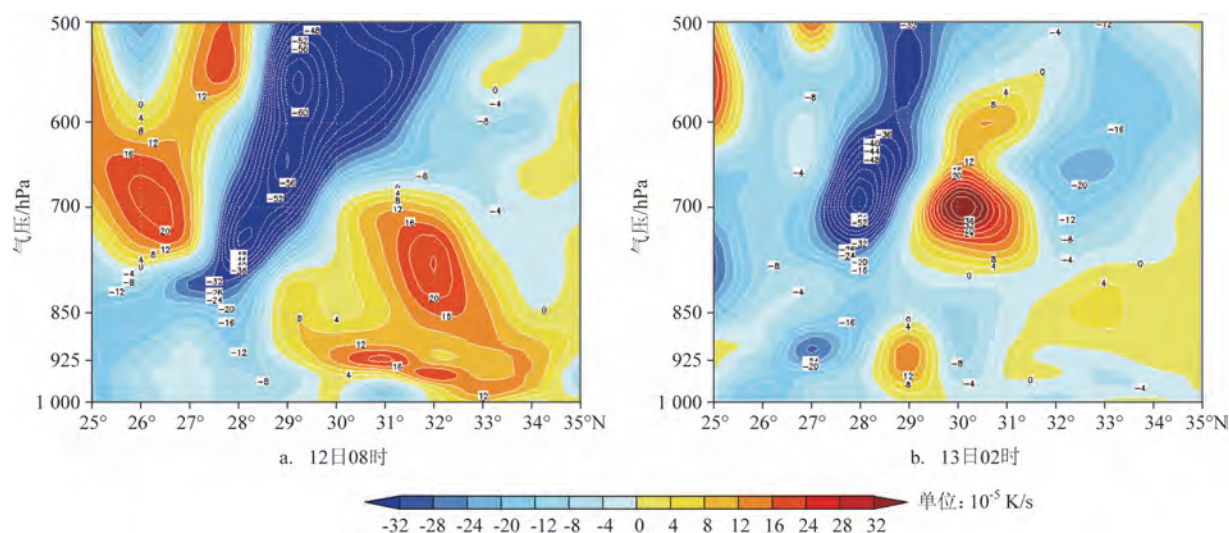


图8 大风过程前后浙北地区沿120°E温度平流剖面的演变

Fig.8 Variation of temperature advection profile along 120°E in northern Zhejiang

构变得更加显著(见图9),上升运动加强,对流发展增强,此时近地层有补充南下的干冷空气卷入。在这种高低空耦合散度场的配置下,当有冷空气挟卷时,强对流云团因干冷空气进入降水拖曳的下沉区,水汽加速蒸发,下沉气流的负浮力增强,产生动量下传大风的动能增大,将中高层强动量向低层和地面传递,从而产生爆发性大风。

2.3.5 成因小结

上述分析表明,4月12日的灾害性大风过程是在高空冷涡底部弱天气强迫背景下,强冷空气主体南下,弱冷空气补充时发生的。原因是多方面的:上干下湿垂直结构、深厚垂直风切变的维持和一定的垂直速度都有利于不稳定层结的发展和维持;高低空温度平流的快速更替和高低空辐合辐散场耦合结构增强了对流发展的动力条件;冷空气挟卷作用又促进强对流云团中下沉负浮力增强,从而加强动量下传,促进过程的发生。

3 浙江冬春季冷涡底部爆发性大风预报分析着眼点

一般动量下传引发的大风在浙江沿海较少且具有突发性和强破坏性。为更好地预报此类大风,本文选取近年较典型的个例(1992年2月23日、1995年11月7日、2001年1月28日、2004年12月30

日和2020年4月12日)做共性分析,从过程发生的季节、时间、形势特征的演变、高空冷中心强度、急流强度、垂直风切变强度及持续时间(以杭州站和上海宝山站为参考点)和24 h地面变高几个方面做共性分析研究,并提出一个天气模型供预报参考(见图10)。

浙江冬春爆发性大风的基本天气模型特征如下:

(1)一般发生在冬春季节,有多股冷空气活跃时期,高空冷中心维持,强度平均达 -40°C 。

(2)东北亚中高纬地区为“一槽一脊”的环流形势,且槽脊呈东北-西南向,等压线密度大且每10个纬度有8~9条等压线,高空锋区较强。通常有横槽快速转竖,槽迅速向南加深或冷涡快速南掉,槽底位置达 30°N 以南,甚至到 25°N 。

(3)存在中心风速达46 m/s以上的高空急流。

(4)存在深厚的垂直风切变:0~6 km高度达强垂直风切变,杭州站可达26 m/s,上海宝山站可达24 m/s,0~3 km高度可达中等强度,即12 m/s;高低空有强温度差动平流区配合。

另外,本文对形势场多要素与过程极大风做相关性分析,选取急流强度、冷中心强度和杭州站与上海站高空垂直风速变化作为主要因子。结果发现,杭州站0~6 km垂直风速变化相关性较为显著,当其配合有利的环流形势时,可以将其作为预报动

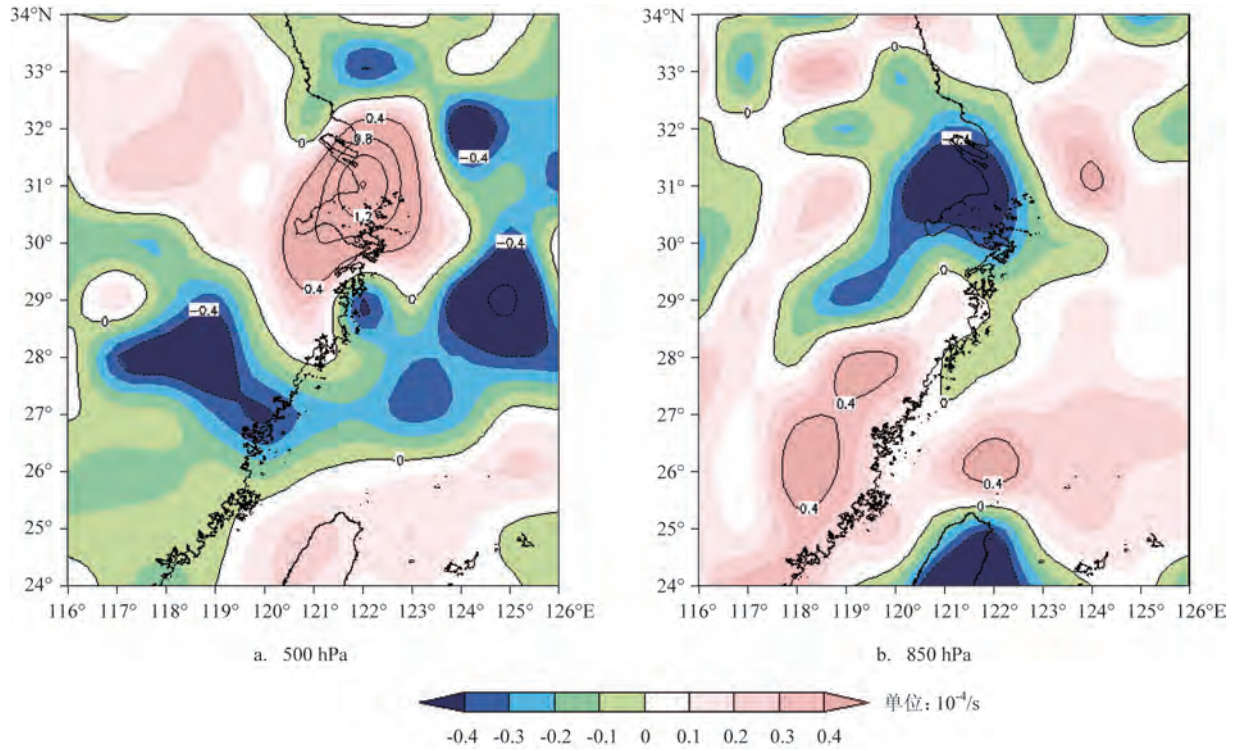


图9 4月12日20时散度场
Fig.9 Divergence field at 20:00 on April 12

量下传大风的一个重要参考指标,其他因子相关性较差。

4 小结与思考

本文对2020年4月12日浙江沿海一次高空冷涡底部动量下传引起的破坏性大风过程进行形势演变和成因分析,并分析了此类预报性差的多个典型个例,提出浙江冬春季爆发性大风的基本天气模型。结果表明:

(1)4月12日的灾害性大风发生在强冷空气南下后,是在新冷空气补充、强垂直风切变、一定的垂直速度、高低空温度平流的快速更替以及高低空辐合辐散场配合冷空气挟卷多因素共同作用下发生的。

(2)此类天气一般发生在冬春冷空气活跃时,特别是冷空气补充南下时,高空冷中心强度可达 -40°C ;中高纬呈“一槽一脊”环流形势,高空槽等压线密集,平均每10个纬度有8~9条等压线;横槽快速转竖,槽底可达 30°N 甚至更南;高空急流强度强,中心风速达 46 m/s 以上;存在深厚的垂直风切

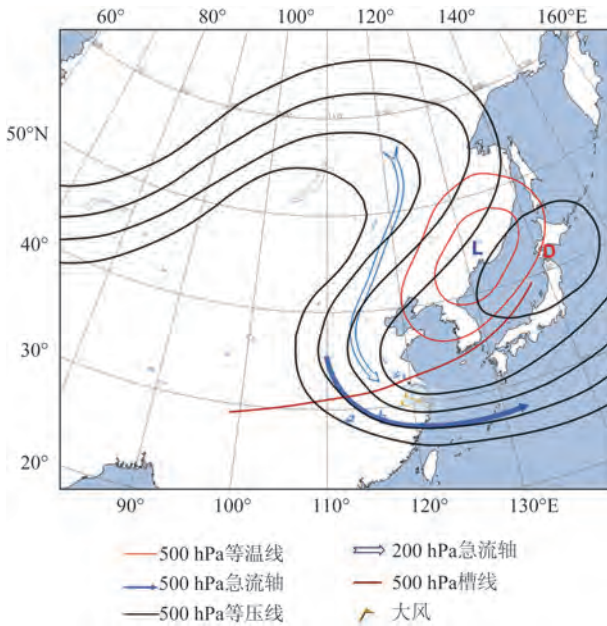


图10 浙江冬春季爆发性大风的天气模型
Fig.10 The weather model of sudden gale in Zhejiang in winter and spring

变;存在强的高低空温度差动平流。

日常预报中,此类过程发生前地面常常已经转北风控制,湿度转差,天气转好,故此类大风往往容易被预报员忽略或低估。本文提出的基本天气模型可在日常预报中作为参考,结合天气实况开展分析,以提高预报的及时性和有效性。

参考文献:

- [1] 孙建明,陈卫锋. 一次动量下传大风过程分析及预报着眼点[J]. 浙江气象科技, 2001, 22(4): 1-4.
Sun J M, Chen W F. Analysis of a momentum downward gale process and the focus of its prediction[J]. Journal of Zhejiang Meteorology, 2001, 22(4): 1-4.
- [2] 曹美兰,项素清. “晴天暴”的物理成因及预报[J]. 气象, 2002, 28(5): 22-26.
Can M L, Xiang S Q. Physical causation and forecast of strong clear-air turbulence[J]. Meteorological Monthly, 2002, 28(5): 22-26.
- [3] 王镇铭,杜惠良,杨诗芳. 浙江省天气预报手册[M]. 北京: 气象出版社, 2013: 312-317.
Wang Z M, Du H L, Yang S F. Zhejiang weather forecast manual [M]. Beijing: China Meteorological Press, 2013: 312-317.
- [4] 王雷. 一次冷空气强风的成因分析[J]. 海洋预报, 2005, 22(4): 96-101.
Wang L. The reason analysis of a case of strong cold air gale[J]. Marine Forecasts, 2005, 22(4): 96-101.
- [5] 项素清. 浙北沿海南大风过程诊断分析[J]. 海洋预报, 2004, 21(1): 75-80.
Xiang S Q. Diagnostic analysis of the south gale in the north coast of Zhejiang province[J]. Marine Forecasts, 2004, 21(1): 75-80.
- [6] 徐哲永,王雷,王坚侃. 舟山群岛海域一次大风过程的诊断分析[J]. 海洋预报, 2012, 29(5): 53-58.
Xu Z Y, Wang L, Wang J K. Diagnosis analysis of a strong gale in Zhoushan islands[J]. Marine Forecasts, 2012, 29(5): 53-58.
- [7] 孙青,盛春岩,刘畅,等. “130318”渤海强风天气成因分析[J]. 海洋预报, 2017, 34(2): 51-59.
Sun Q, Sheng C Y, Liu C, et al. Analysis of the causes of the march 18, 2013 gale process over the Bohai sea[J]. Marine Forecasts, 2017, 34(2): 51-59.
- [8] 吴海英,孙燕,曾明剑,等. 冷空气引发江苏近海强风形成和发展的物理过程探讨[J]. 热带气象学报, 2007, 23(4): 388-394.
Wu H Y, Sun Y, Zeng M J, et al. Discussion of physical mechanisms for a gale process caused by severe cold air offshore Jiangsu[J]. Journal of Tropical Meteorology, 2007, 23(4): 388-394.
- [9] 周后福,范伟,陶寅,等. 安徽一次局地极端大风观测与成因探讨[J]. 灾害学, 2020, 35(2): 97-101, 121.
Zhou H F, Fan W, Tao Y, et al. Observation and genesis of an extreme local gale in Anhui Province[J]. Journal of Catastrophology, 2020, 35(2): 97-101, 121.
- [10] 张琳娜,冉令坤,李娜,等. 雷暴大风过程中对流层中低层动量通量和动能通量输送特征研究[J]. 大气科学, 2018, 42(1): 178-191.
Zhang L N, Ran L K, Li N, et al. Analysis of momentum flux and kinetic energy flux transport in the middle and lower troposphere during a thunderstorm event[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2018, 42(1): 178-191.
- [11] 程雪玲,曾庆存,胡非,等. 大气边界层强风的阵性和相干结构[J]. 气候与环境研究, 2007, 12(3): 227-243.
Cheng X L, Zeng Q C, Hu F, et al. Gustiness and coherent structure of strong wind in the atmospheric boundary layer[J]. Climatic and Environmental Research, 2007, 12(3): 227-243.
- [12] 郭仲勋,王式功,尚可政,等. 冷空气大风过程中动量下传特征[J]. 中国沙漠, 2016, 36(2): 467-473.
Wu Z X, Wang S G, Shang K Z, et al. The characteristics of momentum transfer during a cold strong wind process[J]. Journal of Desert Research, 2016, 36(2): 467-473.
- [13] 陈淑琴,黄辉. 舟山群岛一次低压大风过程的诊断分析[J]. 气象, 2006, 32(1): 68-73.
Chen S Q, Huang H. Diagnosis of gales caused by depression in Zhoushan Islands[J]. Meteorological Monthly, 2006, 32(1): 68-73.
- [14] 朱乾根,林锦瑞,寿绍文,等. 天气学原理和方法[M]. 4版. 北京: 气象出版社, 2007: 204-246.
Zhu Q G, Lin J R, Shou S W, et al. Principles and methods of weather[M]. 4th ed. Beijing: China Meteorological Press, 2007: 204-206.

Analysis of the disastrous gale caused by downward transportation of momentum in the coastal areas of Zhejiang province in winter and spring

YANG Yiping¹, SHI Hengyu², LIU Liyuan³, WANG Lijuan¹

(1. Taizhou Meteorological Bureau, Taizhou 318000 China; 2. Zhejiang Meteorological Disaster Warning Center, Hangzhou 31000 China; 3. Xianju Meteorological Bureau, Xianju 317300 China)

Abstract: The causes of a disastrous gale along the coast of Zhejiang province is analyzed in this paper. In addition, the commonality of such sudden gales by analyzing similar cases is studied, and a basic weather model of sudden gale caused by downward transportation of momentum in winter and spring in Zhejiang coastal area is proposed. The results show that strong vertical wind shear, significant vertical velocity and the rapid alternations of high-level and low-level temperature advection are the main reasons for this gale. Moreover, the coupling of convergence and divergence fields at high and low altitudes accompanied by the entrainment of cold air strengthens the sinking negative buoyancy in the strong convective clouds, which favors the strong downward momentum transmission that leads to the occurrence of sudden gales. The characteristics of the weather mode of such gales reveal that when cold air is active in winter and spring, the strong cold center maintains and the middle and high latitude of Northeast Asia shows a "one trough and one ridge" pattern with dense isobars of the upper-level trough. When the high-altitude transversal trough quickly turns to vertical, the trough bottom can reach 30°N and its south. Also, it cooperates with the high-altitude jet stream with the central wind speed of over 46 m/s, the vertical wind shear over 26 m/s and strong temperature differential advection in the high and low altitude.

Key words: downward transportation of momentum; jet stream; cold air; gale