

郑丽娜,刘冬冬,何鹏程.山东大风天气的低频特征及机理分析[J].海洋气象学报,2021,41(2):70-77.
ZHENG Lina, LIU Dongdong, HE Pengcheng. Analysis on low-frequency characteristics and mechanism of strong wind in Shandong [J]. Journal of Marine Meteorology, 2021, 41(2): 70-77. DOI: 10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2021.02.007. (in Chinese)

山东大风天气的低频特征及机理分析

郑丽娜^{1,2},刘冬冬³,何鹏程²

(1.山东省气象防灾减灾重点实验室,山东 济南 250031;2.济南市气象局,山东 济南 250102;3.东营市垦利区气象局,山东 垦利 257500)

摘要: 利用山东省122个国家级地面气象观测站的风速数据与欧洲中期天气预报中心(ECMWF)提供的ERA-interim再分析数据,采用小波分析、带通滤波等方法对2015年9月—2020年9月山东的大风天气及相应的低频大气环流形势进行分析。结果表明,近几年山东的大风天气有增加的趋势,春季大风发生频次最多,秋季最少;山东半岛东部大风频次最多,鲁南地区最少;全年只有7月偏南大风站次较偏北大风多,其余月份多以偏北大风为主。山东大风具有显著的11~13 d与20~23 d的低频振荡周期。其中,春季大风以11~13 d的振荡周期为主,秋、冬季以20~23 d的振荡周期为主,夏季大风的振荡周期不明显。振荡周期的演变与大范围的大风过程有对应关系,大范围的大风过程大致发生在振荡的波峰处。春季偏北大风盛行时,多伴有经向风自北向南的传播。秋季大约以35°N为界,对流层中高层在35°N以北,经向风自南向北传播,35°N以南,则是自北向南传播,对流层中低层反之。山东春季大风产生之前,乌拉尔山东侧低频气旋与黄海上空低频反气旋同时出现并东移,之后衍生出华北低频反气旋与渤海低频气旋,这两个系统的加强促使华北上空偏北风加大,为山东大风的产生提供了可能。同时,华北地区经向风正距平逐渐被负距平所代替,是山东大风天气产生的又一先兆。

关键词: 山东大风; 低频特征; 振荡周期; 经向传播

中图分类号: P458.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-3599(2021)02-0070-08

DOI: 10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2021.02.007

Analysis on low-frequency characteristics and mechanism of strong wind in Shandong

ZHENG Lina^{1,2}, LIU Dongdong³, HE Pengcheng²

(1. Key Laboratory for Meteorological Disaster Prevention and Mitigation of Shandong, Jinan 250031, China; 2. Jinan Meteorological Bureau, Jinan 250102, China; 3. Kenli Meteorological Bureau of Dongying, Kenli 257500, China)

Abstract Based on the wind speed data from 122 national meteorological observation stations in Shandong and ERA-Interim reanalysis data provided by ECMWF, the strong winds and corresponding low-frequency atmospheric circulations in Shandong from September 2015 to September 2020 are analyzed by using wavelet analysis and band-pass filtering. The results are as follows. The frequency of strong winds in Shandong has increased in recent years with the highest frequency in spring and the lowest in autumn; the most frequent strong winds occur in the east of Shandong Peninsula and the least in the south of Shandong Province; the southerly winds are more frequent than northerly winds only in July for the

收稿日期:2020-12-05; 修订日期:2021-02-06

基金项目:山东省气象局重点科研项目(2019sdqzx09)

通信作者:郑丽娜,女,博士,正高级工程师,主要从事短中期天气预报,dongyingzln@163.com。

whole year, while the northerly winds are dominant in other months. The frequency of strong winds in Shandong has significant low-frequency oscillation periods of 11–13 d and 20–23 d, among of which the oscillation period of 11–13 d is dominant in spring and the oscillation period of 20–23 d in autumn and winter, and the oscillation period in summer is not obvious. The evolution of oscillation period relates to the large-scale strong wind process, which occurs roughly at the peak of the oscillation wave. When the northerly strong winds are prevailing in spring, they are often accompanied by the propagation of meridional winds from north to south. In autumn, the meridional winds are propagated from south to north in the middle and upper troposphere on the north of 35°N and from north to south on the south of 35°N, while the propagation is opposite in the middle and lower troposphere. Before the occurrence of strong winds in spring in Shandong, the low-frequency cyclone over the east of the Ural Mountains and the low-frequency anticyclone over the Yellow Sea simultaneously appear and move eastward, and then the low-frequency anticyclone over North China and low-frequency cyclone over the Bohai Sea are derived. The strengthening of these two systems promotes the increase of the northerly winds over North China, which makes possible the occurrence of strong winds in Shandong. At the same time, the positive anomalies of meridional winds are gradually replaced by the negative anomalies over North China, which is another precursor of strong winds in Shandong.

Key words strong winds in Shandong; low-frequency characteristics; oscillation period; meridional propagation

引言

大风是山东一年四季最常见的一种灾害性天气,不仅能造成农作物倒折减产,而且往往给海上运输、捕捞、内河航运、水产养殖、石油开发等造成巨大的损失或威胁。干旱的季节,大风常常引起沙尘天气,地面大量的尘沙被强风吹起,给人民的生产、生活造成严重的危害。近几年,对于大风的研究,主要集中在以下几个方面:一是对灾害性大风天气的特征研究^[1];二是对由强对流天气引起的大风个例分析^[2–6];三是对灾害性大风天气的预报与检验方面的研究^[7]。针对山东的大风天气过程,曹钢锋等^[8]利用1971—1980年的大风数据,总结出山东的大风日数北部沿海最多,鲁南内陆最少;春、冬两季的大风日数最多,夏季最少。杨晓霞等^[9]利用2001—2010年的观测数据统计了山东沿海的偏北大风,归纳了产生偏北大风的概念模型。郭俊建和孙莎莎^[10]则利用2010—2012年的逐时大风数据统计了山东沿海的大风日数及其分布。以上的这些研究成果对于认识山东大风的特点及其形成机理起到了积极作用。随着新型探测仪器在业务中的应用,高时间分辨率的大风数据不断被获取,利用这些数据可以获得更精确的分析结果。本文利用时间尺度精准到秒的资料,分析近几年山东大风的

时空分布特征,对以往山东大风的研究给予必要的补充。

异常的大气环流是造成灾害性大风的主要原因,而大气低频振荡对异常环流的形成和维持具有十分重要的作用。已有研究^[11]表明,大气低频振荡对东亚的天气、气候有重要的影响。在冬季,引起大风的寒潮天气过程往往是强盛的东亚冬季风造成的。东亚冬季风具有明显的季节内变化特征,往往表现为冷空气的频发,导致寒潮天气南下,给我国大部地区带来严重低温、大风、暴雪等灾害性天气^[12]。丁一汇等^[13]研究了东亚寒潮爆发过程,表明冷空气主要以准双周低频模态的形式向南传播。东亚冬季风的强度与我国冬季大部分地区的气温呈显著的负相关,东亚冬季风不仅影响华北、长江中下游地区的冬季气温,还会进一步影响到华南、西南地区。刘樱等^[14]指出30~60 d低频环流场上西西伯利亚附近的低频反气旋及日本海附近的低频气旋是造成华北持续性异常低温事件的重要低频影响因子。目前有关气温、降水等要素的低频振荡特征研究得比较多,对于大风的低频振荡特征研究得相对偏少。因此,本文运用山东122个国家级地面气象观测站逐日逐时的大风观测数据分析山东大风的特征,并探讨大气环流低频传播与大风之间的联系,从而增进人们对山东大风天气的了解。

1 数据与方法

1.1 数据

本文使用的资料:1)欧洲中期天气预报中心(ECMWF)提供的ERA-interim再分析资料,水平分辨率为 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$,垂直方向从1 000 hPa到10 hPa共16层,主要是U风与V风数据。2)山东省122个国家级地面气象观测站(以下简称“122站”)2015年9月—2020年9月逐时风场数据,资料来源于山东省气象信息中心。

1.2 方法

按中国气象局第16号、气发[2005]109号及气办发[2010]19号等文件中有关大风的定义,本文以20时为日界,统计山东122站日内滑动10 min平均风速最大值与最大瞬时风速值(瞬时风速指3 s平均风速)。一天内只要有1站的10 min平均风力达到6级(风速 $v \geq 10.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)或瞬时风力达到7级(风速 $v \geq 13.9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)以上,定义该站出现大风一次,记为1站次。西北风—北风—东北风之间的风向定义为偏北风,西南风—南风—东南风之间的风向定义为偏南风。

为了分析不同层次风场的低频特征,对风场数据进行巴特沃斯带通滤波器滤波,这种方法在大气科学研究中被广泛应用。

2 山东大风的分布特征

由2015年9月—2020年9月山东省16个地级市年平均大风站次分布(图1)可以看到,大风主要出现在山东半岛东部,即烟台北部、威海市辖区内,年频次在200站次以上,其中威海市辖区内最多可达355站次;其次大风多出现在青岛市、济南市及烟台市辖区的南部,年频次在150~200站次;出现大风最少的区域在鲁南,主要在枣庄市,年频次为39

站次。由2016—2019年大风累计总站次的年统计(图2a)可知,2016年累计出现大风2 673站次,2017年为2 853站次,2018年为2 942站次,2019年则达到2 953站次,可见这几年山东大风呈现逐年上升的趋势。由大风各月站次分布(图2b)来看,3月大风出现最多,累计2 088站次,9月最少,为417站次。从季节上看,春季(3—5月)出现站次最多,平均2 025站次/月,最少的为秋季(9—11月),平均为815站次/月。

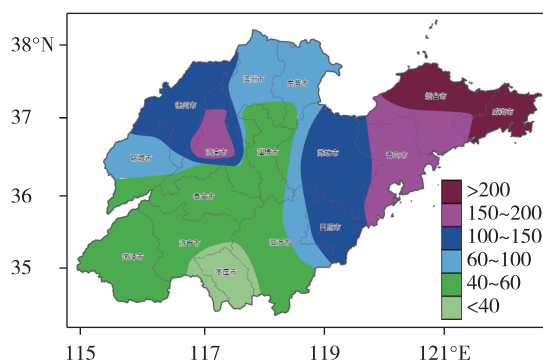


图1 2015年9月—2020年9月山东16地市大风年平均站次(色阶,单位:站次)分布

Fig.1 Distribution of annual mean frequency of strong winds in 16 cities of Shandong from September 2015 to September 2020 (color scale, units: times)

图3给出了2016—2019年各年、各月南大风与北大风累计站次分布。从图3a中可以看到,南大风在2018年出现最多,为590站次;在2019年最少,为492站次。北大风出现最多的年份是2019年,为1 580站次;最少的是2018年,为1 308站次。北大风出现站次为南大风的2~3倍。由各月的累计站次分布(图3b)来看,总体上北大风站次也多于南大风站次,只有7月南大风站次略偏多,为310站次,而北大风为233站次。在统计中发现,济南站(站号54823)无论是年统计还是月统计,其南大风站次

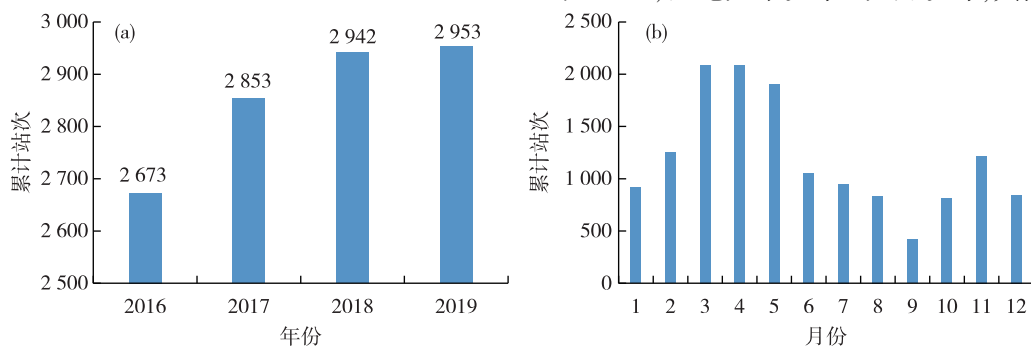


图2 2016—2019年各年大风累计总站次分布(a)与各月大风累计站次分布(b)

Fig.2 Distribution of annual (a) and monthly (b) cumulative frequency of strong winds from 2016 to 2019

明显多于北大风站次,这与其他地市不同。以春季为例,济南站在春季(3—5月)大风出现的站次最

多,这点与其他地市一致,但是其南大风累计出现 73 站次,而北大风仅有 8 站次,偏南大风明显偏多。

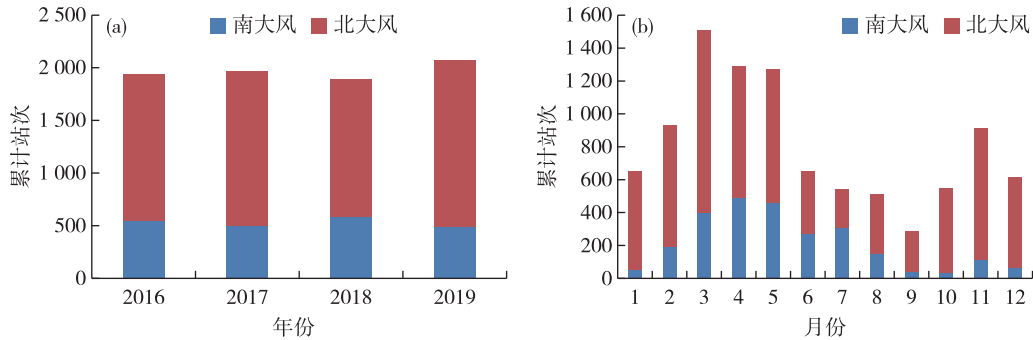


图 3 2016—2019 年南、北大风年累计站次分布(a)与各月南、北大风累计站次分布(b)

Fig.3 Distribution of annual (a) and monthly (b) cumulative frequency of southerly and northerly strong winds from 2016 to 2019

为了诊断山东大风发生频次是否具有低频振荡特征,本文对 2015—2020 年逐日逐站大风站次进行累加统计,然后对逐日累加站次序列进行小波分析。小波分析也称多分辨率分析,是一种信号时间-尺度(频率)分析方法,研究不同尺度周期随时间的演变情况,具有多分辨率分析和对信号的自适应性的特点,被认为是傅立叶分析方法的突破性进展^[15]。本文采用墨西哥帽小波函数^[16]变换,最后计算小波方差。从图 4a 中可以看到,在 1 a 的时间尺度内,1~150 d 间存在 15 d 与 20~25 d 的周期,表现为多-少等多个循环交替。在 150~220 d 间存在 10~15 d 的周期,在 220~366 d 间则 20 d 的周期更明显。结合小波方差(图 4b)分析,全年中 11~13 d 与 20~23 d 的振荡周期方差在 500 以上,说明全年中这两个振荡周期最明显,可见山东大风具有显著的低频振荡特征。

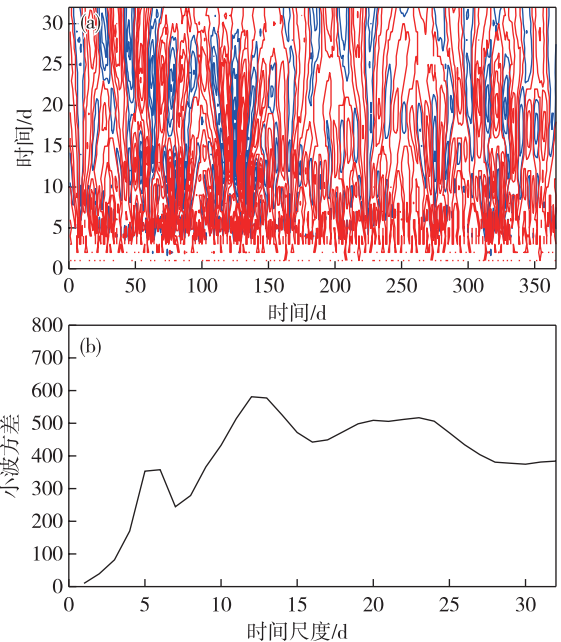


图 4 2015 年 9 月—2020 年 9 月山东大风日累计站次序列小波变换实部(a)与小波方差(b)

Fig.4 Real part of wavelet transform (a) and variance of wavelet (b) of time series of daily cumulative frequency of strong winds in Shandong from September 2015 to September 2020

图 5 是 2015 年 9 月—2020 年 9 月山东春、夏、秋、冬四季大风逐日累加站次的演变和 11~13 d 以及 20~23 d 带通滤波后的站次时间序列。从图 5a 中可以看到,11~13 d 的振荡在整个春季都比较显著,除了 4 月 16—18 日的大风外,其余时段大风的演变与振荡周期之间均有很好的对应关系,几次大范围大风过程均发生在振荡的波峰处。20~23 d 的振荡幅度要弱于 11~13 d 的振荡,其随着时间的演变和大风站次的关系不如 11~13 d 显著,但是在 4 月中旬与 5 月上旬其振荡周期与站次分布趋于一致。夏季的低频振荡强度偏弱,尽管 8 月 11~13 d 的振荡强度增强,但是其与大风站次的分布不相对应。秋季,20~23 d 的振荡较 11~13 d 的振荡显著,除 9 月上中旬外,其余时段 20~23 d 振荡周期与大

风站次分布趋于一致。冬季,20~23 d 的振荡与大范围大风站次的分布基本一致。

3 大风低频振荡的传播特征

大风天气的产生是不同纬度、不同高度、不同尺度天气系统相互作用的结果。有研究^[17]表明,经向风的强度可以表征冷空气的强度。由春季 114~122°E 平均经向风(V) 11~13 d 滤波值的时间-纬度

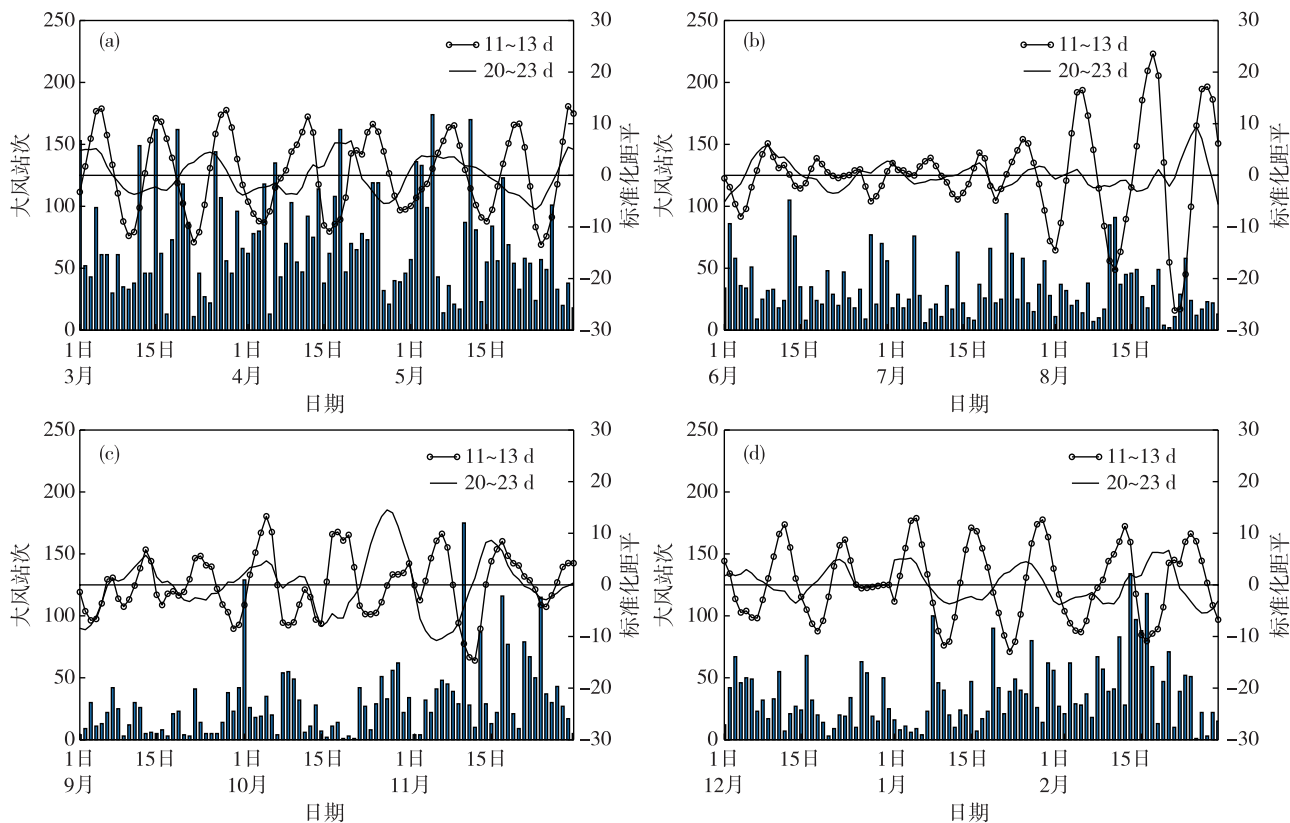


图5 2015年9月—2020年9月山东春(a)、夏(b)、秋(c)与冬(d)四季大风序列时间演变(柱状表示实际逐日大风站次的累加,圆点实线表示11~13 d滤波后大风站次,实线表示20~23 d滤波后的大风站次)

Fig.5 Time series of strong winds in Shandong in spring (a), summer (b), autumn (c), and winter (d) from September 2015 to September 2020 (bar for observed daily frequency of strong winds, solid line with dots for 11~13 d filtered data of frequency, black solid line for 20~23 d filtered data of frequency)

剖面图(图6)可以看到,自3月1日—5月31日,200 hPa与500 hPa经向风在春季有9次明显的经向风传播过程,3—5月几乎每半个月就会发生一次。850 hPa与1 000 hPa经向风的传播不及200 hPa与500 hPa的强度强,但是9次经向风传播过程还是很清楚,且大都表现为由北向南的传播过程,这与春季山东盛行偏北大风一致。

秋季经向风的传播与春季明显不同。由秋季 $114^{\circ}\sim 122^{\circ}\text{E}$ 平均经向风20~23 d滤波值的时间-纬度剖面图(图7)可以看到,200 hPa经向风的大值中心在 35°N 附近, 35°N 以北,经向风传播表现为自南向北, 35°N 以南,传播则是自北向南。500 hPa经向风的传播与200 hPa相似,只是10月下旬之后这种传播特征更为明显。850 hPa经向风的传播与200 hPa、500 hPa不同,其在 35°N 以北是自北向南传播,而 35°N 以南,则是自南向北传播,表明在对流层低层, 35°N 以北以偏北风为主,以南则是偏南风为主。1 000 hPa经向风的传播方向自北向南的传播更加明显,说明在秋季,冷空气势力在对流层

中低层较中高层明显。

为了细致分析山东春季大风的低频特征和相应环流形势的演变机理,针对春季完整的几次11~13 d的低频循环,将每个振荡周期划分为6个位相,其中第一位相是11~13 d低频强度最弱的位相,对应山东大风出现站次最少的时段,第四位相是低频强度最强的位相,其时间和山东大风5次大范围大风过程时间基本一致,第二、三位相和第五、六位相是低频振荡由弱(强)变强(弱)的位相,这6个位相包含了低频大风过程的整个周期。

根据山东大风11~13 d振荡的6个不同位相合成低频循环的1 000 hPa低频距平风场(图8)。从图中可以看到,在第一位相时,1 000 hPa的环流形势表现为乌拉尔山东侧是一低频气旋,黄海上空为低频反气旋,两个系统之间多为经向风的正距平;在第二、三位相,乌拉尔山东侧的低频气旋强度逐渐加强,范围不断扩展,且缓慢向东移动;黄海上空的反气旋也逐渐东退;在内蒙古中部衍生出一个低频反气旋;中国大陆正逐渐由经向风的正距平调整

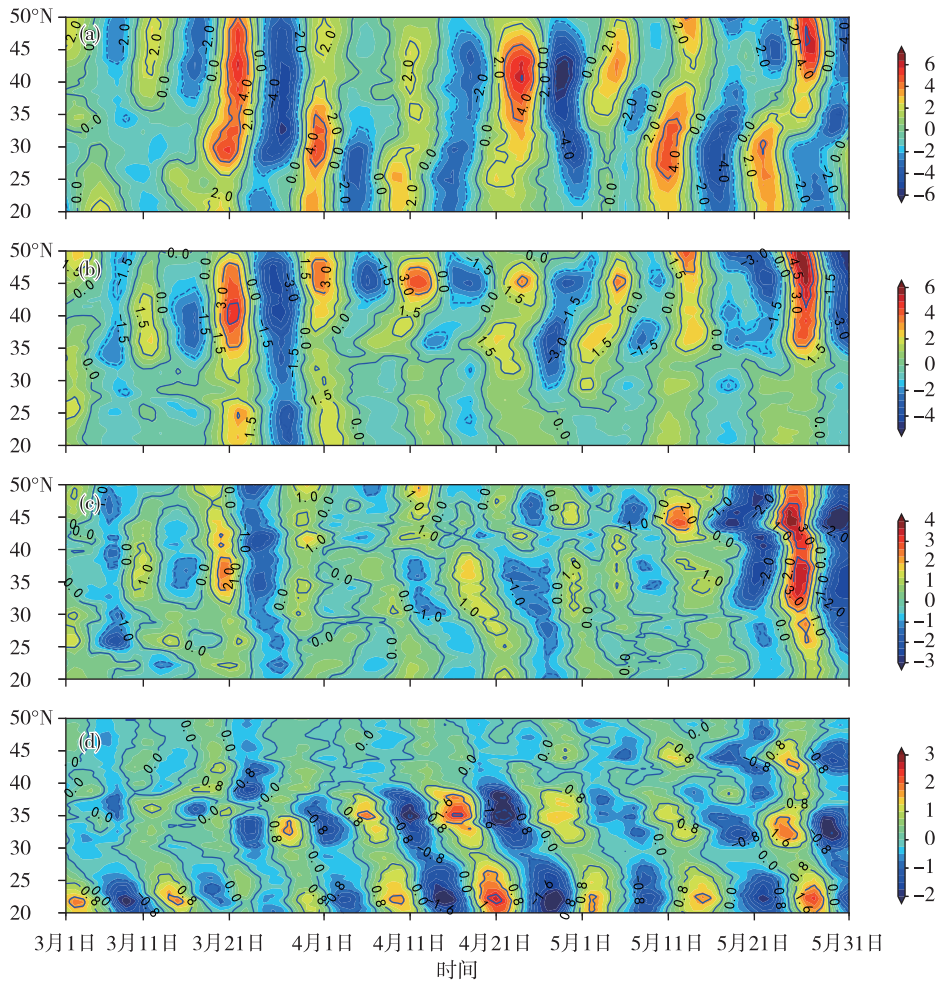


图 6 春季 114°~122°E 平均经向风 11~13 d 滤波值的时间-纬度剖面图(色阶,单位: $m \cdot s^{-1}$; a. 200 hPa, b. 500 hPa, c. 850 hPa, d. 1 000 hPa)

Fig.6 Time-latitude cross section of 11~13 d filtered data of average meridional wind between 114°E and 122°E in spring (color scale, units: $m \cdot s^{-1}$; a. 200 hPa, b. 500 hPa, c. 850 hPa, d. 1 000 hPa)

为经向风的负距平。在第四位相,蒙古中部的低频反气旋势力增强,并向东南方向扩展,控制着内蒙古中部及华北地区,同时在渤海及渤海海峡附近有一低频气旋在发展,蒙古低频反气旋右侧的偏北风与渤海低频气旋左侧的东北风加大了山东上空的偏北风,这是山东发生大风天气的一个原因。在第五位相,华北低频反气旋与渤海低频气旋强度明显减弱,黄海上空的经向风正距平势力显著增强。第六位相时,华北上空的风进一步减弱,黄海上空低频气旋又开始建立,乌拉尔山东侧也开始有负的经向风距平出现,新一轮振荡又在酝酿中。由以上分析可知,山东春季大风的产生最明显的近地层低频特征是乌拉尔山东侧低频气旋与黄海低频反气旋的出现与加强,随着这两个系统的东移,蒙古低频反气旋与渤海气旋的产生与增强是山东产生大风的一个原因。同时,乌拉尔山东侧经向风的负

距平向东移动、扩张与南下,华北地区经向风正距平逐渐被负距平所代替,是山东春季大风产生的低频征兆。

4 结论

本文对 2015 年 9 月—2020 年 9 月山东的大风天气进行分析,不仅讨论了山东大风的特征,还从低频振荡的角度探讨了大气环流低频振荡与山东大风的的关系,结果表明:

- 1) 山东大风发生频次近几年有上升趋势,春季发生次数最多,秋季最少。山东半岛东部发生频次最多,鲁南地区最少。山东大风多以偏北大风为主,只有在 7 月偏南大风较偏北大风频次略多。
- 2) 山东大风存在显著的 11~13 d 与 20~23 d 低频振荡周期,其中春季的主振荡周期为 11~13 d,秋、冬季为 20~23 d,夏季的振荡周期不显著。一般

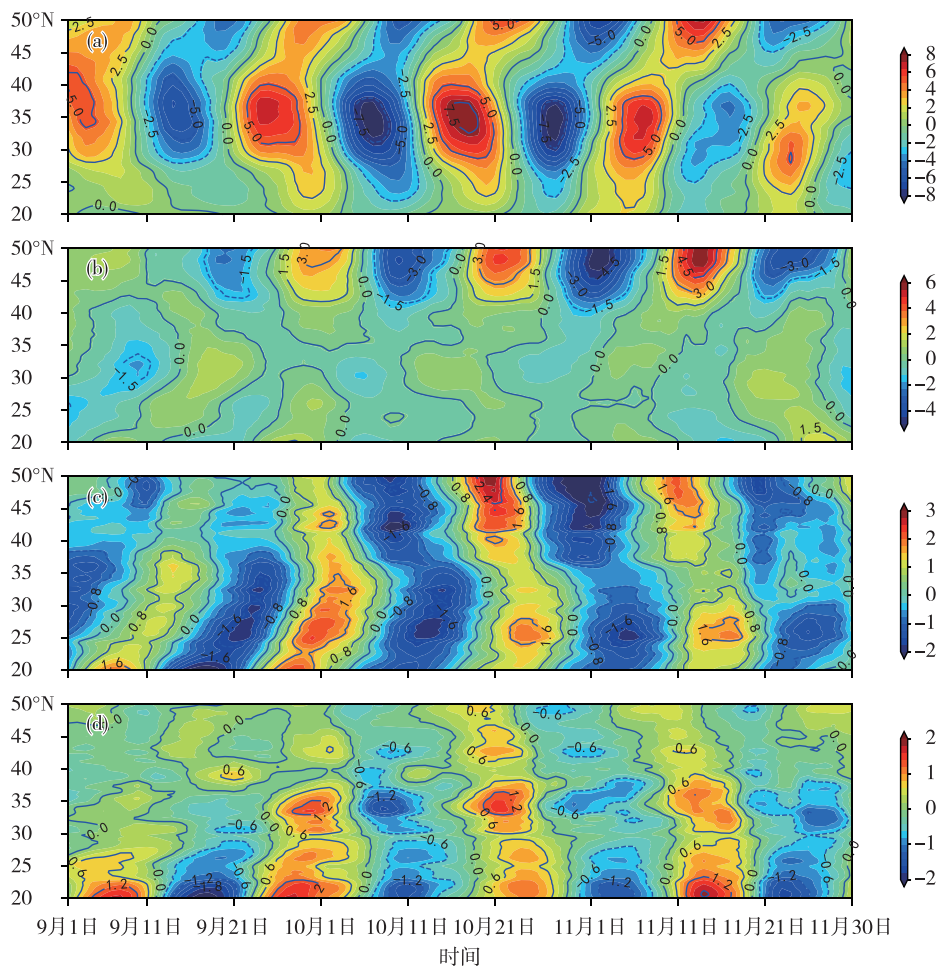


图7 秋季114°~122°E平均经向风20~23 d滤波值的时间-纬度剖面图(色阶,单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; a. 200 hPa, b. 500 hPa, c. 850 hPa, d. 1 000 hPa)

Fig.7 Time-latitude cross section of 20~23 d filtered data of average meridional wind between 114°E and 122°E in autumn (color scale, units: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; a. 200 hPa, b. 500 hPa, c. 850 hPa, d. 1 000 hPa)

主振荡周期的演变和大范围大风发生的频次有较好的对应关系,大范围的大风过程基本发生在振荡的波峰处。

3) 春季,对流层内大气低频环流多为自北向南的传播,对流层中高层的传播强度明显较低层偏强。秋季,对流层中高层的低频环流以35°N为界,35°N以北,经向风传播表现为自南向北,35°N以南,传播则是自北向南,对流层低层反之。

3) 山东大风产生之前,1 000 hPa低频环流乌拉尔山东侧低频气旋与黄海上空低频反气旋同时存在。在两个系统东移的过程中,华北低频反气旋与渤海低频气旋生成并加强,同时华北上空经向风正异常逐渐被经向风负异常所代替,是山东大风天气产生的低频征兆。

参考文献:

- [1] 蔡晓杰,王琴,朱智慧,等.上海沿岸海域灾害性大风特征研究与预报检验[J]. 海洋预报,2020,37(2):46-53.
- [2] 万夫敬,江敦双,赵传湖.2017年8月6日山东罕见雷暴大风成因分析[J]. 海洋气象学报,2018,38(2):60-66.
- [3] 王俊.线状中尺度对流系统的多普勒雷达统计特征分析[J]. 海洋气象学报,2017,37(4):25-33.
- [4] 郑丽娜,刘畅,宿秋兰,等.2019年6月黄河口6次局地冰雹实例分析[J]. 海洋气象学报,2020,40(1):79-89.
- [5] 刁秀广,侯淑梅.4次大暴雨过程雷达径向速度和超低空西南急流特征分析[J]. 海洋气象学报,2017,37(3):46-53.
- [6] 张琴,孟伟,朱敏,等.2016年6月13—14日山东强对流天气过程的中尺度特征及成因分析[J]. 海洋气象学报,2017,37(4):101-112.

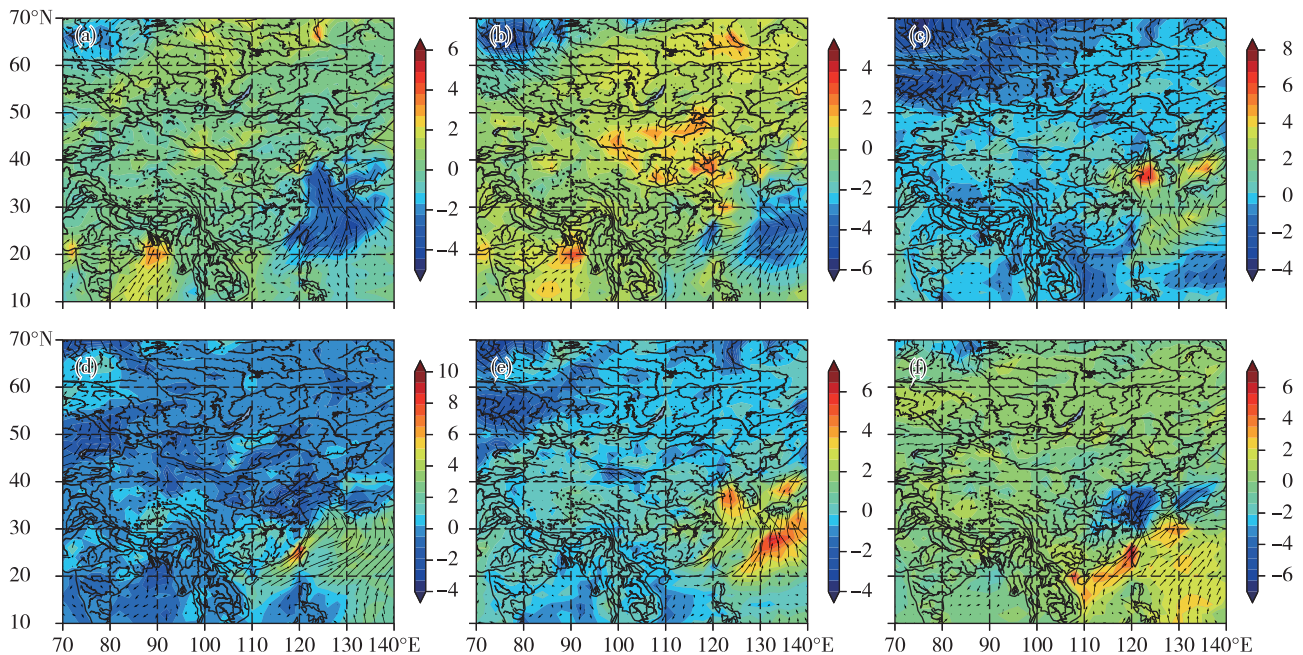


图8 山东春季大风11~13 d低频振荡的6个位相合成的1 000 hPa低频风场(箭头,单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)和经向风异常(色阶,单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)(a.第一位相,b.第二位相,c.第三位相,d.第四位相,e.第五位相,f.第六位相)

Fig.8 Low-frequency wind field (arrow, units: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) at 1 000 hPa and meridional wind anomaly (color scale, units: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) during 6 phases based on 11-13 d low-frequency oscillation of strong winds in Shandong in spring (a, b, c, d, e, and f for the first, second, third, fourth, fifth, sixth phase, respectively)

- [7] 孙晓磊,黄彬,易笑园,等.渤海中南部突发性大风成因分析及预报思考[J]. 海洋预报,2018,35(4):47-57.
- [8] 曹钢锋,张善军,朱官忠,等.山东天气分析与预报[M]. 北京:气象出版社,1988:241-245.
- [9] 杨晓霞,盛春岩,沈建国,等.山东沿海偏北大风的天气学模型和物理量特征[J]. 海洋预报,2014,31(3):45-55.
- [10] 郭俊建,孙莎莎.山东沿海精细化海区大风特征分析[J]. 海洋预报,2014,31(4):41-46.
- [11] 李崇银,龙振夏,穆明权.大气季节内振荡及其重要作用[J]. 大气科学,2003,27(4):518-535.
- [12] 王东阡,崔童,司东,等.2014/2015年东亚冬季风活动特征及其可能成因分析[J]. 气象,2015,41(7):907-914.
- [13] 丁一汇,柳艳菊,梁苏洁,等.东亚冬季风的年代际变化及其与全球气候变化的可能联系[J]. 气象学报,2014,72(5):835-852.
- [14] 刘樱,郭品文,冯涛,等.华北地区冬季持续性异常低温事件与大气低频振荡活动的关系[J]. 大气科学学报,2016,39(3):370-380.
- [15] 孙然好,潘保田,牛最荣,等.河西走廊近50年来地表水资源时间序列的小波分析[J]. 干旱区地理,2005,28(4):455-459.
- [16] 许月卿,李双成,蔡运龙.基于小波分析的河北平原降水变化规律研究[J]. 中国科学:地球科学,2004,34(12):1176-1183.
- [17] CHAN J C L, AI W X, XU J J. Mechanism responsible for the maintenance of the 1998 South China Sea summer monsoon[J]. J Meteor Soc Japan Ser II, 2002, 80(5): 1103-1113.