

王亚男,刘一玮,易笑园,2020.渤海西部雷雨大风统计特征及对流参数指标分析[J].气象,46(3):325-335. Wang Y N, Liu Y W, Yi X Y, 2020. Statistical characteristics and convection indexes of thunderstorm and gale over western Bohai Sea[J]. Meteor Mon, 46(3):325-335(in Chinese).

## 渤海西部雷雨大风统计特征及对流参数指标分析<sup>\*</sup>

王亚男<sup>1</sup> 刘一玮<sup>2</sup> 易笑园<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 天津海洋中心气象台,天津 300074

<sup>2</sup> 天津市气象台,天津 300074

**提 要:** 使用2011—2016年5—9月渤海西部7个海岛、平台、浮标站加密资料等,对渤海西部雷雨大风统计特征进行分析,结果表明:渤海西部雷雨大风以8~9级为主,主要发生在渤海西部偏南海区;6月发生最多,其次是7月,5月最少,其中,6月过程主要发生在19—23时,同时,高空冷涡影响过程是低槽影响过程次数的两倍,且以带状回波影响最多,占68.8%;大风发生前6~12 h,渤海西部比上游陆地站温度每经度低6℃,而在大风发生前1~2 h,比上游沿岸温度每经度高4℃以上,气压每经度低2 hPa;同时,使用订正探空资料分析渤海西部雷雨大风发生前对流参数指标及其参考阈值,结果表明:抬升指数、大风指数、最佳对流有效位能和0~3 km垂直风切变在渤海西部相对华北陆地更明显,分别给出渤海西部6—9月逐月以及高空冷涡和高空低槽背景下的抬升指数、大风指数、最佳对流有效位能和0~3 km垂直风切变参考阈值,为渤海西部雷雨大风预报提供参考。

**关键词:** 渤海西部,雷雨大风,天气型,回波特征,订正探空,对流参数指标

**中图分类号:** P433, P413

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.7519/j.issn.1000-0526.2020.03.004

## Statistical Characteristics and Convection Indexes of Thunderstorm and Gale over Western Bohai Sea

WANG Yanan<sup>1</sup> LIU Yiwei<sup>2</sup> YI Xiaoyuan<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Tianjin Marine Meteorological Centre, Tianjin 300074

<sup>2</sup> Tianjin Meteorological Observatory, Tianjin 300074

**Abstract:** The statistical characteristics of thunderstorm and gale over western Bohai Sea were analyzed using dense observation data of seven stations at islands, platforms and buoy stations in western Bohai Sea from May to September during 2011—2016. The results showed that the thunderstorm and gale forces in western Bohai Sea are mainly the magnitude of 8—9, which are seen in the more southern part of the western Bohai Sea, mostly in June, then in July and rarely in May. The process in June, mostly occurring from 19:00 BT to 23:00 BT, is related to cold vortex twice as many as high-level trough, and the most is related to band echo, which accounts for 68.8%. The sea surface temperature is 6℃ per longitude lower than the coastal temperature in 6—12 h before the occurrence of thunderstorm and gale, but the sea surface temperature and pressure are higher 4℃ per longitude and lower 2 hPa per longitude than in coastal area in 1—2 h before thunderstorm and gale. At the same time, the index thresholds of thunderstorm and gale were analyzed using corrected sounding data. The results showed that BCAP, LI, WINDEX and the 0—3 km vertical wind shear are more obvious in western Bohai Sea than in North China. The convection index thresholds of BCAP, LI,

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金项目(41705032和41575049)及环渤海区域科技协同创新基金项目(QYXM201604)共同资助

2018年9月17日收稿; 2019年5月29日收修定稿

第一作者:王亚男,主要从事海洋气象灾害预报和研究工作. Email: wang\_ya\_nan05@126.com

WINDEX and 0—3 km vertical wind shear which could offer references for the forecast of thunderstorm and gale in western Bohai Sea from June to September are given, under background of high-level trough and cold vortex.

**Key words:** western Bohai Sea, thunderstorm and gale, weather type, characteristics of radar echo, corrected sounding data, convection index

## 引言

海上大风是一种严重的气象灾害。在渤海,按照影响系统分类,可划分为冷空气影响的冷高压型(盛春岩等,2014)、温带气旋型(苗春生等,2015)、热带气旋型和强对流引起的短时大风(孙密娜等,2016;李燕等,2013)。前三种属于系统性大风,在常规天气图上,有明显的天气系统配合,持续时间一般较长,而由强对流引起的短时大风(即雷雨大风),常由近地面的中小尺度系统触发,在常规天气图上一概没有明显的征兆,有较强的隐蔽性,具有突发性强、持续时间短、破坏力大的特点,这给预报造成了很大的困难(苏涛等,2016;俞小鼎等,2012)。

现有的渤海雷雨大风的研究多集中在海岸带附近,郭庆利等(2011)、王彦等(2009;2011)分别给出烟台北部和渤海西部近岸海域出现雷雨大风的雷达回波形态和径向速度类型及其特征;刘彬贤等(2015)、李延江等(2013)、宋晓姜等(2013)使用多普勒天气雷达和多种观测资料或数值模拟的方法,对渤海海岸带雷雨大风个例的形成发展进行诊断或数值模拟分析,于志明等(2018)利用曹妃甸浮标站资料对其附近海域出现雷雨大风的时间、天气型和预报指标进行研究。由于海上资料匮乏,渤海海区的强对流大风过程多以个例研究为主,而对于渤海雷雨大风的统计研究,多集中在渤海近岸,且主要以发生雷雨大风时的雷达回波形态和径向速度研究为主,对于其预报指标等的研究则相对较少。

相对于渤海海面雷暴大风的研究,华北附近地区雷暴大风的研究则更加全面和深入,费海燕等(2016)研究认为雷暴大风环境参数中中低层垂直风切变(地面至 700 hPa 和地面至 500 hPa 平均值分别为 10.1 和 14.3  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ),明显低于美国大范围雷暴的均值;严尧仕等(2013)和柴东红等(2017)分别给出华北和京津冀地区雷暴大风发生时,不同天

气背景和逐月动力热力指标阈值;秦丽等(2006)、高晓梅等(2018)以及杨璐等(2018)分别研究对流参数和雷达统计特征在北京或鲁中地区雷雨大风对流发展潜释预报和预警提前量中的指示意义;孙继松等(2014)、章国材(2011)和许爱华等(2014)对我国中东部地区雷雨大风的时空分布、形成机制、环境条件和预报方法等方面都进行了详细的阐述。从预报方法研究来看,关注对流参数在对流天气发生发展指示意义方面的研究相对较多,而对于渤海西部海面来说,这方面的研究则较少。

在这样的研究背景下,为了研究对流参数在渤海西部雷雨大风预报中的指示意义,首先使用渤海西部 7 个海岛、平台、浮标站(渤海西部代表站如图 1 所示)加密观测资料等,分析渤海西部出现雷雨大风的时空分布和天气背景等统计特征,并在此基础上,使用逐时加密订正探空资料,分别按照逐月 and 不同天气背景给出对渤海西部雷雨大风发生发展具有指示意义的对流参数及其参考阈值,为渤海西部雷雨大风的预报提供参考依据。

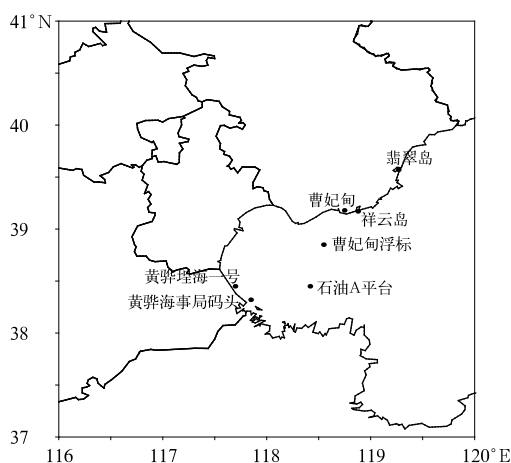


图1 渤海西部代表站

Fig. 1 Representative stations in western Bohai Sea

## 1 雷雨大风过程挑选

由于测站海拔高度不同,使用风速随高度变化指数定律公式,将代表站风速订正到 10 m 高度处:

$$u_z/u_{10} = (z/10)^\alpha$$

式中: $u_z$  为海平面上空  $z$  高度处风速; $u_{10}$  为海平面上空 10 m 高度处的风速; $\alpha$  表示风速随高度变化的幂指数,其大小表示了风速垂直切变的强度,一般与下垫面性质和大气层结状态有关,根据《建筑结构荷载规范(GB5009—2012)》(中华人民共和国住房和城乡建设部, 2012)海上梯度风变化的幂指数在 0.12 左右。

雷雨大风过程挑选标准:代表站瞬时风速(或最大风速) $\geq 17 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,相应海域出现雷电天气,同时为去除系统性大风的影响,将瞬时风速(或最大风速) $\geq 17 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 持续时间达 3 h 以上的过程去除。当有多个测站先后监测(不超过 12 h)到雷雨大风并受同一天气系统影响时,认为是一次过程。2011—2016 年 5—9 月渤海西部雷雨大风过程相关信息见表 1。

## 2 雷雨大风特征分析

### 2.1 时空分布

从表 1 2011—2016 年 5—9 月渤海西部雷雨大风发生时间和代表站风速来看,共有 42 次过程,其中,监测到的最大瞬时风速达  $35 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,但大于等于 10 级( $\geq 24.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ )的站次较少,仅占约 29%。其中,渤海西部偏南海区的石油 A 平台、黄

骅海一号和黄骅海事局码头监测到的过程较多,分别为 21、18 和 14 次;渤海西部偏北海区的 4 个测站监测到的过程相对较少且分布比较均匀,其中以曹妃甸和翡翠岛监测到的过程最少,均为 7 次过程,以曹妃甸浮标监测到的过程最多,也仅有 9 次过程。

从表 1 雷雨大风发生时间和图 2 雷雨大风逐月逐时分布情况来看,6 月出现的雷雨大风最多,有 16 次过程,占比为 38.1%,主要发生在 17 时至次日 02 时,尤以 19—23 时最多;其次是 7 月,有 10 次过程,占比为 23.8%,主要发生在 16 时至次日 07 时;而 8 月有 8 次过程,占比为 19%,主要发生在 18 时至次日 01 时,尤以 19—20 时和 01 时最多;9 月有 7 次过程,占比为 16.7%,主要发生在 17—18 时和 1—4 时;5 月出现的最少,占比仅在 2.4%。

### 2.2 环境条件

#### 2.2.1 天气型

根据雷暴大风发生时高空 500 hPa 的天气背景,将渤海西部雷雨大风分为三种天气型,即高空冷涡型、高空低槽型和副热带高压(以下简称副高)边缘型,每次过程天气分型如表 1 所示,其中,受高空冷涡影响最多,共有 21 次过程,占比为 50%,此背景下的雷雨大风主要发生在 6 月,占此类背景下总过程数的近 48%,与 7—9 月发生的此类背景下的雷雨大风过程数相当;其次是高空低槽型,有 16 次过程,占比为 38%,此背景下在 6—9 月各月发生的雷雨大风过程数基本相当,只在 8 月略少;另外受副高边缘型影响很少,占比仅在 7% 左右,此背景下的雷雨大风主要发生在 7—8 月;其他类型还有 2 次过程,占比为 5%。

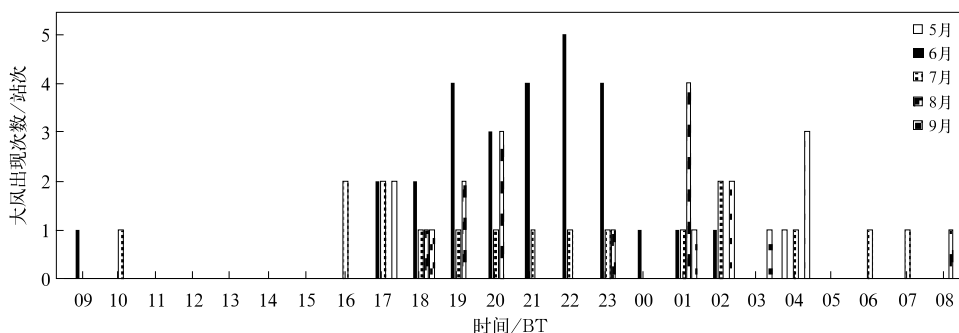


图 2 2011—2016 年 5—9 月渤海西部雷雨大风逐时分布站次

Fig. 2 Station distribution of hourly thunderstorm and gale in western Bohai Sea from May to September of 2011–2016

表 1 2011—2016 年 5—9 月渤海西部雷雨大风过程序号、发生时间、代表站风速、天气形势和回波形态

Table 1 The process number, time, stations, wind speed, weather situations and echo patterns from

May to September of 2011—2016 in western Bohai Sea

序号	样本时间/年-月-日-时	代表站(瞬时风速或最大风速)	天气形势/回波形态
1	2011-6-11-19:03	A 平台 ( $19.9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	高空冷涡/带状回波
2	2011-9-1-01:06	曹妃甸 ( $18 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	西北气流/带状回波(有阵风锋)
3	2012-5-14-03:47	A 平台 ( $19.4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	高空冷涡/带状回波
4	2012-6-9-20:00—21:00	曹妃甸( $25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ )、翡翠岛( $19 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ )、曹妃甸浮标( $28 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ )、A 平台( $28.7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	高空冷涡/带状回波(有阵风锋)
5	2012-7-4-05:25	A 平台( $24.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	高空冷涡/弓形回波
6	2012-7-26-07:00	曹妃甸浮标( $22 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ )、A 平台( $21.9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	副高边缘/非典型回波(有阵风锋)
7	2012-9-27-17:00—18:00	曹妃甸( $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ )、曹妃甸浮标( $35 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ )、祥云岛( $21 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	高空低槽/块状回波(有阵风锋)
8	2013-6-18-18:00	翡翠岛( $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	高空冷涡/带状回波(有阵风锋)
9	2013-6-25-22:00	A 平台( $26.1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ )、曹妃甸浮标( $31 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	高空低槽/弓形回波
10	2013-8-1-01:00	曹妃甸浮标( $18 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	高空冷涡/带状回波(有阵风锋)
11	2013-8-4-23:00 至 5-00:00	A 平台( $30.7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ )、曹妃甸( $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ )、曹妃甸浮标( $29 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ )、祥云岛( $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ )、黄骅埕海一号( $23 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ )、黄骅海事局码头( $22 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	高空低槽/带状回波(有阵风锋)
12	2013-8-7-19:00—20:00	黄骅埕海一号( $28 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ )、黄骅海事局码头( $27 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ )、曹妃甸浮标( $24 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ )、曹妃甸( $19 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	副高边缘/块状回波
13	2013-8-31-20:00	翡翠岛( $23 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	高空冷涡/带状回波(有阵风锋)
14	2013-9-2-04:00	翡翠岛( $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	高空冷涡/带状回波
15	2013-9-14-01:00—02:00	曹妃甸( $17 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ )、翡翠岛( $19 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ )、曹妃甸浮标( $18 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ )、祥云岛( $21 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	高空低槽/弓形回波
16	2014-6-6-17:00	黄骅埕海一号( $26 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ )、黄骅海事局码头( $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	高空低槽/带状回波
17	2014-6-8-19:00	黄骅埕海一号( $22 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ )、黄骅海事局码头( $27 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ )、A 平台( $24.4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	高空冷涡/带状回波(有阵风锋)
18	2014-6-26-21:00	翡翠岛( $17 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	高空低槽/带状回波(有阵风锋)
19	2014-7-1-16:00—17:00	A 平台( $22.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ )、黄骅埕海一号( $23 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ )、黄骅海事局码头( $19 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	高空低槽/块状回波
20	2014-7-16-16:00	曹妃甸浮标( $21 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ )、祥云岛( $17 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	高空低槽/弓形回波
21	2014-7-17-01:00	黄骅埕海一号( $29 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	高空低槽/带状回波
22	2014-8-17-01:00	黄骅埕海一号( $23 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ )、黄骅海事局码头( $19 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	高空冷涡/块状回波
23	2015-6-1-20:00	翡翠岛( $19 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	高空低槽/弓形回波
24	2015-6-10-16:29	A 平台( $25.3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	高空冷涡/块状回波
25	2015-7-24-18:00	黄骅埕海一号( $24 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ )、黄骅海事局码头( $23 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	高空低槽/块状回波
26	2015-7-27-04:00	翡翠岛( $21 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	高空冷涡/块状回波
27	2015-7-29-22:00—23:00	黄骅埕海一号( $23 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ )、黄骅海事局码头( $26 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ )、A 平台( $20.9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	高空冷涡/非典型回波
28	2015-8-27-07:19	A 平台( $21.3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	高空冷涡/块状回波
29	2015-9-25-03:00—04:00	黄骅埕海一号( $21.9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ )、黄骅海事局码头( $21.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ )、A 平台( $25.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	高空低槽/带状回波
30	2016-6-10-21:00—22:00	黄骅埕海一号( $29 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ )、A 平台( $28.7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ )、黄骅海事局码头( $29.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	高空冷涡/带状回波
31	2016-6-17-22:00—23:00	黄骅埕海一号( $22.4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ )、黄骅海事局码头( $18.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ )、A 平台( $25.7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	高空冷涡/带状回波(有阵风锋)
32	2016-6-18-22:00	黄骅埕海一号( $25.6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ )、黄骅海事局码头( $22.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	高空冷涡/带状回波
33	2016-6-21-23:00	曹妃甸( $20.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ )、A 平台( $24.7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	高空低槽/带状回波(有阵风锋)
34	2016-6-22-22:00	黄骅埕海一号( $25.6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ )、黄骅海事局码头( $20.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ )、A 平台( $20.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	西北气流/块状回波

(续表 1)

序号	样本时间/年-月-日-时	代表站(瞬时风速或最大风速)	天气形势/回波形态
35	2016-6-24-01:00—02:00	祥云岛( $17.3\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ )、A 平台( $19.9\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ )	高空冷涡/带状回波(有阵锋)
36	2016-6-30-09:00	黄骅埕海一号( $26.5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ )	高空冷涡/弓形回波
37	2016-7-23-10:00	祥云岛( $20.5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ )	高空低槽/非典型回波
38	2016-7-30-20:00	黄骅埕海一号( $22.2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ )、黄骅海事局码头( $19.2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ )、A 平台( $22.7\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ )	高空冷涡/块状回波
39	2016-8-12-18:00—19:00	黄骅埕海一号( $17.1\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ )、A 平台( $19.9\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ )	副高边缘/非典型回波
40	2016-8-27-20:00	祥云岛( $17.5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ )	高空低槽/带状回波(有阵锋)
41	2016-9-5-04:00	曹妃甸( $19\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ )、黄骅埕海一号( $18.7\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ )、A 平台( $28.8\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ )	高空冷涡/弓形回波
42	2016-9-16-17:00	祥云岛( $19.9\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ )	高空低槽/块状回波(有阵锋)

2.2.2 地面变压和变温特征

2.2.2.1 代表站变压和变温

图 3a 和 3b 分别为石油 A 平台雷雨大风发生前 12 h 内变压和变温分布。从图 3 可以看出,在雷雨大风发生前 6~12 h 内,一般会出现负变压和正变温,过去 3 h 负变压一般在 2 hPa 左右,逐时负变压一般在 1 hPa 左右;逐时变温一般不超过 2℃,过去 3 h 正变温不超过 6℃;而在雷雨大风发生时,一般会出现正变压和负变温,逐时或 3 h 正变压一般在 2 hPa 左右,最大可达 5 hPa 以上;逐时负变温一般在 3℃ 以上,最大可达 8~9℃。

2.2.2.2 与上游陆地站压差和温差

选取渤海西部代表站石油 A 平台和上游陆地代表站塘沽站,绘制雷雨大风发生前 12 h 内石油 A 平台与塘沽站的逐时气压差和温差。从图 4 可以看出,在雷雨大风发生前的 6 h 左右,出现最大温差,即陆地比海上温度高,一般每经度大于 6℃,最大可达 10℃,主要是由于海陆下垫面不同性质的差异,在夏季午后常常在海岸带有明显的温度梯度,与沿

海的对流系统有着密切的关系;而在雷雨大风发生前 1~2 h,海陆上空冷暖性质发生转变,此时,海上站一般比上游陆地站每经度温度高 4℃ 以上,气压每经度低 2 hPa。主要由于本文研究过程有 90% 以上的对流回波是在陆地生成发展东移入海后在渤海西部产生雷雨大风,上游陆地站受对流影响形成冷池,气温明显下降,使海陆温差性质发生转变,海面温度比陆地温度高,气压比陆地低,且具有一定的分布规律,说明上游受雷暴影响形成的冷池与下游形成的温度梯度,可能对渤海西部雷雨大风的形成有一定的影响。对于陆地过程已有相应的研究,如程月星等(2018)和肖现等(2015)认为,上游雷暴的冷池出流与下游暖湿气流形成明显风速辐合和强烈扰动温度梯度,对触发新生单体并迅速发展有重要影响,陈明轩等(2011;2017)认为对流风暴的新生地点和传播方向与局地冷池造成的强温度梯度有关。本文统计给出雷雨大风影响前海面站与上游陆地站的温差和气压差的变化情况,为移行入海后在渤海西部产生雷雨大风的预报提供参考依据。

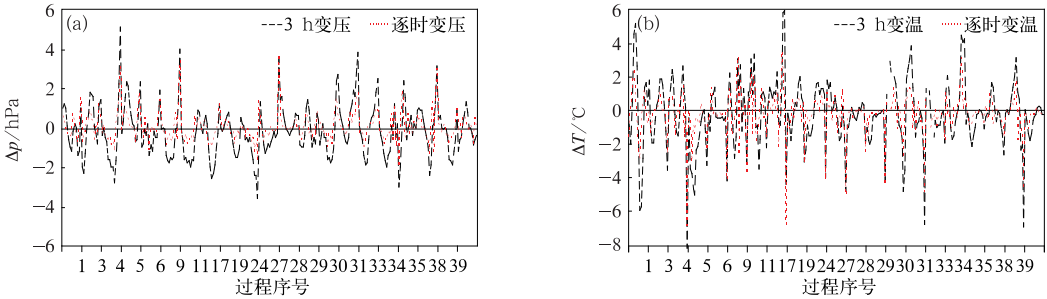


图 3 石油 A 平台雷雨大风发生前 12 h 内变压和变温分布

(a)3 h 变压和逐时变压,(b)3 h 变温和逐时变温

Fig. 3 Pressure and temperature change distribution of Oil Platform A during 12 h before thunderstorm and gale in western Bohai Sea

(a) hourly and 3 h pressure change, (b) hourly and 3 h temperature change

### 2.3 雷达回波特征

根据回波发展形态,参考北京(杨璐等,2018)和天津(王彦等,2009)雷暴大风回波分类,将渤海西部产生雷雨大风的雷达回波分为带状回波、弓形回波、块状回波和非典型回波,其中:带状回波一般由多个对流回波单体相连排列成带状,回波长度远大于宽度,雷达  $1.5^\circ$  仰角的回波强度一般在  $50\sim 55$  dBz 以上,边界较为光滑,传播方向与回波带垂直;弓形回波是具有向前凸起、形如弓状的回波,雷达  $1.5^\circ$  仰角的回波强度为  $50\sim 65$  dBz,强回波带后侧有弱回波通道或后侧入流缺口;块状回波是雷达  $1.5^\circ$  仰角的回波强度达  $50$  dBz 或以上的块状零散回波,一般

与独立的单体发展有关。典型个例如图 5 所示。

从表 1 渤海西部雷雨大风雷达回波形态来看,带状回波过程最多,有 20 次(伴有阵风锋的有 11 次),其中受高空冷涡影响的过程最多,有 12 次,其次是受高空低槽影响的,有 7 次,另外,带状回波过程主要出现在 6 月(有 11 次过程);其次,块状回波有 11 次过程(伴有阵风锋的有 2 次),受高空冷涡和高空低槽影响最多,分别为 5 和 4 次过程,块状回波主要发生在 7—8 月(共有 7 次过程);另外,弓形回波有 7 次过程,主要受高空低槽和高空冷涡影响,分别有 4 次和 3 次过程,弓形回波主要发生在 6—7 月(有 5 次过程);非典型回波有 4 次过程,1 次出现阵风锋。

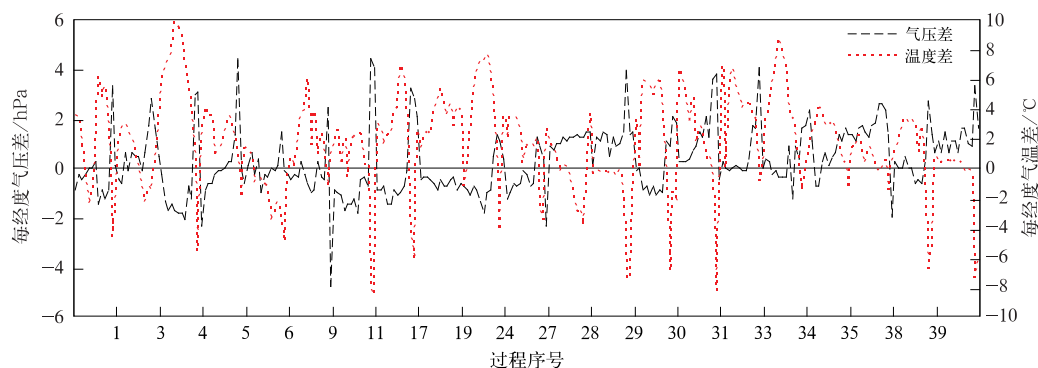


图 4 雷雨大风发生前 12 h 内塘沽与石油 A 平台站逐时气压差和温差分布

Fig. 4 Pressure and temperature difference distribution between Tanggu and Oil Platform A during 12 h before thunderstorm and gale

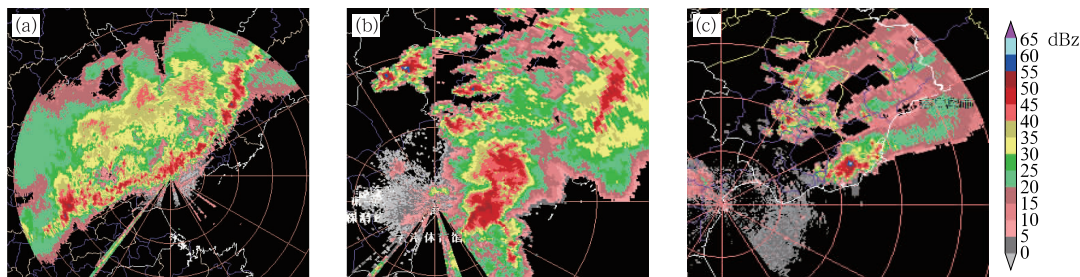


图 5 天津雷达  $1.5^\circ$  仰角基本反射率产品

(a) 2013 年 8 月 4 日 22:00(带状回波有阵风锋), (b) 2014 年 7 月 16 日 15:06 (弓形回波), (c) 2016 年 9 月 16 日 17:00(块状回波)

Fig. 5 Radar base reflectivity at  $1.5^\circ$  elevation in Tianjin

(a) 22:00 BT 4 August 2013 (banded echo with gust front),

(b) 15:06 BT 16 July 2014 (bow echo),

(c) 17:00 BT 16 September 2016 (block echo)

### 3 强对流参数阈值统计

#### 3.1 资料及分析方法

渤海西部没有探空资料,所以在实际预报中,预报员通常使用北京和乐亭探空来分析渤海地区的强对流天气。但实际上陆地和海洋天气差异较大,尤其是在边界层内,由于下垫面的不同存在很大差异。根据天气学原理,当陆地和海洋受同一天气系统控制且天气形势较为稳定少变时,两地在边界层外的大气结构差异不大,可以使用 850 hPa 以上探空资料分析渤海地区的强对流天气;而在 850 hPa 以下的边界层内,海陆的热力、动力结构差异较大,不能将陆地探空资料用于海洋上空的分析。因此选择渤海西部逐时加密自动站数据与 850 hPa 以上北京和乐亭探空资料形成加密订正探空资料(在探空资料选择时利用邻近原则),计算多种对流参数,通过分析渤海西部雷雨大风发生前 12 h 极值,提炼雷雨大风发生时具有指示意义的预报指标及参考阈值。

根据对流参数的物理意义及预报员使用经验挑选,本文采用 K 指数、沙氏指数(SI)、3~6 km 垂直风切变作为表征环境背景的物理量,以及具有中尺度特征的物理量:抬升指数(LI)、最佳对流有效位能(BCAPE)、0~3 km 垂直风切变和大风指数(WINDEX)。将各对流参数样本,从小到大进行排列,绘制箱形图,分别显示最小值、25%分位值、50%分位值、75%分位值和最大值。将 25%分位值或 75%分位值左右的值,作为参考阈值,即当大于这个阈值或者小于这个阈值时,有 75%左右的样本都包括在其内,将此边界值作为对流参数的参考阈值。

#### 3.2 对流参数阈值分析

##### 3.2.1 最佳对流有效位能

BCAPE 是风暴潜在强度的一个重要指标,是可能转换为上升运动动能的一种能量,一般 BCAPE 值越大越有利。对 2011—2016 年 6—9 月渤海西部 BCAPE 逐月统计(图 6a),BCAPE 最大值出现在 8 月,最小值出现在 6 月,其 6—9 月 25%分位值分别为 1223.8、2416.2、3595.8 和 1673.1  $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,同时在高空低槽背景下的 BCAPE 值比高空冷涡背景下的值大,25%分位值分别为 2403 和 1590  $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,对比北京(秦丽等,2006)出现雷雨大风时,有 68%

的过程  $\text{BCAPE} > 1000 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,说明其 25%分位值  $< 1000 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,相比渤海西部各月 25%分位值要小,因此,在雷雨大风发生前,渤海西部 BCAPE 更明显,可以作为渤海西部雷雨大风发生潜势的一个指标,选取 25%分位左右值作为 BCAPE 阈值。

##### 3.2.2 抬升指数

LI 是表示条件性稳定度的一个指数,其为负值时表示气层不稳定。对 2011—2016 年 6—9 月渤海西部 LI 逐月和天气型统计(图 6b),除了 6 月有 7%以下的过程,LI 为正值外,6—9 月的其他过程,LI 均为负值,说明在渤海西部雷雨大风发生之前,LI 参考性较好。其中,6—9 月以及高空冷涡和高空低槽背景下的 LI 75%分位值分别 -4.0、-6.3、-7.9、-6.7、-5.2 和 -6.2  $^{\circ}\text{C}$ ,均值分别为 -5.2、-8.7、-10.0、-8.0、-7.4 和 -8.8  $^{\circ}\text{C}$ ,对比北京(秦丽等,2006)出现雷雨大风的 LI 均值为 -4.6  $^{\circ}\text{C}$  且 81%的雷暴大风  $\text{LI} < -2^{\circ}\text{C}$ ,渤海西部均值和 75%分位值抬升指数负值更大,LI 负值绝对值越大,表明气层越不稳定,选取 75%分位值左右作为 LI 的阈值。

##### 3.2.3 大风指数

WINDEX 是为预报微下击暴流潜释引入的一个指数,主要估测下沉对流潜释,一般 WINDEX 越大越有利。对 2011—2016 年 6—9 月渤海西部 WINDEX 逐月和天气型统计(图 6c),在渤海西部雷雨大风发生前,WINDEX 都很明显,其中以 8 月的大风指数最大,最小值也达到 33.6,在 6—9 月以及高空冷涡和高空低槽背景下,WINDEX 25%分位值分别为 21.9、26.2、34.8、26.7、25.7 和 24.9,均值分别为 27.9、35.8、39.9、28.8、30.9 和 32.0,对比北京(秦丽等,2006)和华北高空槽前(严仕尧等,2013)出现雷雨大风的大风指数均值分别为 28.7 和 27.2,渤海西部 WINDEX 均值更大,从以上分析来看,WINDEX 是渤海西部强对流大风发生前的一个重要指标,将 WINDEX 25%分位左右值作为阈值。

##### 3.2.4 0~3 km 和 3~6 km 垂直风切变

环境风场的垂直切变特征对雷暴的结构、形态、生命史以及活动有着重要的影响。从渤海西部 0~3 km 垂直风切变(图 6d)的分布范围来看,6—9 月和高空冷涡、高空低槽背景下的均值分别为 13.3、11.3、10.3、12.0、12.9 和 11.6  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,其 25%分位值分别为 11.6、7.9、8.9、10.4、11.2 和 8.6  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,相比华北(费海燕等,2016)强雷暴大风产生的 0~

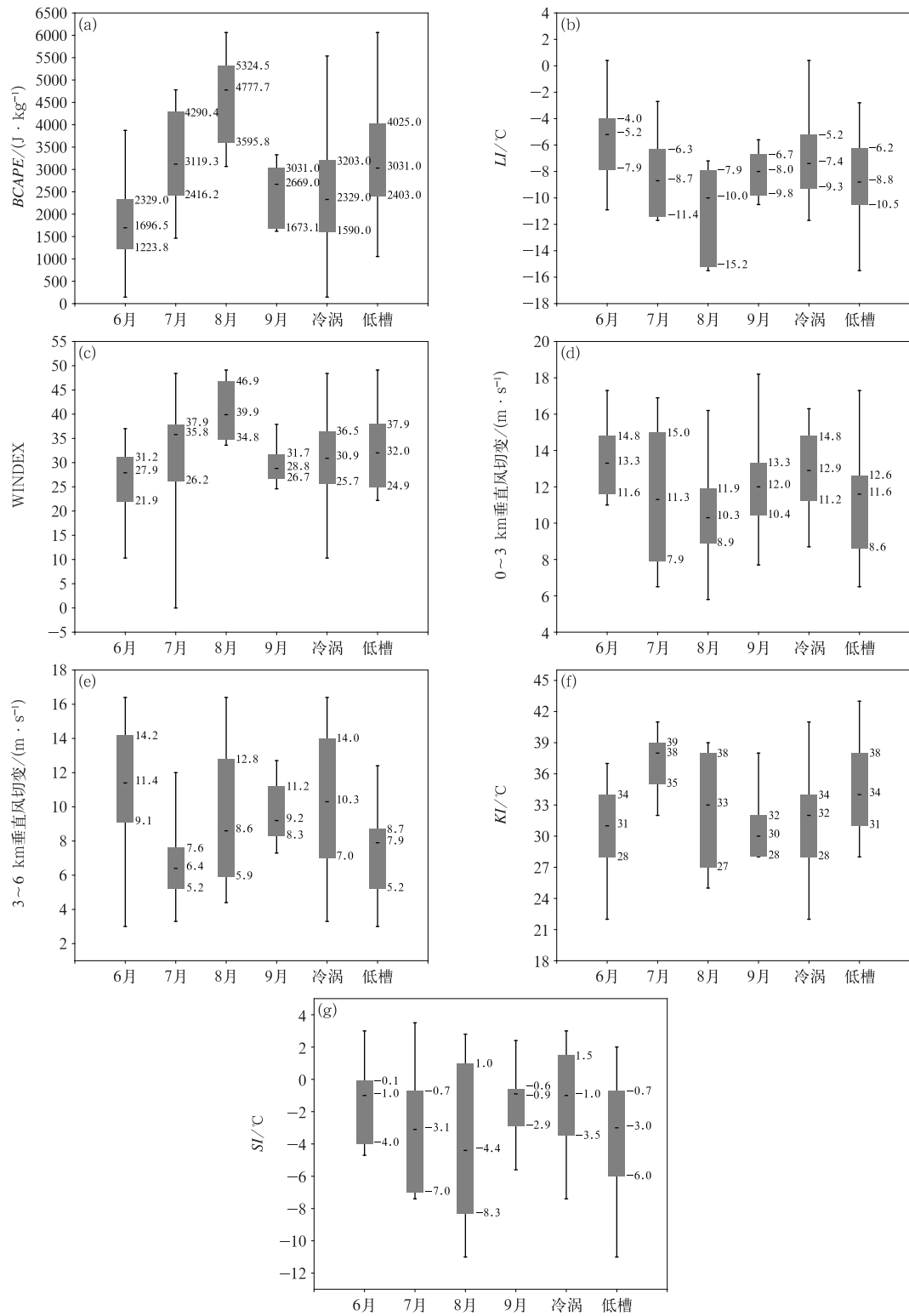


图 6 2011—2016 年 6—9 月逐月和天气型对流参数箱型图

(a)BCAPE,(b)LI,(c)WINDEX,(d)0~3 km 垂直风切变,

(e)3~6 km 垂直风切变,(f)K 指数,(g)SI

Fig. 6 Monthly and synoptic convection parameter boxes from June to September of 2011–2016

(a) BCAPE, (b) LI, (c) WINDEX, (d) 0–3 km vertical wind shear,

(e) 3–6 km vertical wind shear, (f) KI, (g) SI

3 km 垂直风切变均值为  $10.1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 25% 分位值为  $6.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 渤海西部 0~3 km 的垂直风切变更大; 3~6 km 垂直风切变(图 6e), 6—9 月和高空冷涡、高空低槽背景下的均值, 分别为  $11.4$ 、 $6.4$ 、 $8.6$ 、 $9.2$ 、 $10.3$  和  $7.9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 其 25% 分位值分别是  $9.1$ 、 $5.2$ 、 $5.9$ 、 $8.3$ 、 $7.0$  和  $5.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。总的来看, 在渤海西部雷雨大风发生前, 垂直风切变较强, 尤其是 0~3 km 垂直风切变较明显, 表明在中低层有一定的垂直风切变利于强对流的发生发展, 将 25% 分位值作为阈值。

### 3.2.5 K 指数

K 指数是表征大气层结稳定度的参数, 一般 K 指数越大, 大气层结越不稳定。对 2011—2016 年 6—9 月渤海西部 K 指数逐月和天气型统计(图 6f), K 指数分布范围较大, 如 6 月, 在  $22 \sim 37^\circ\text{C}$ , 7 月分布最集中且数值最大, 6—9 月 K 指数的 25%~75% 分位值分别为  $28 \sim 34$ 、 $35 \sim 39$ 、 $27 \sim 38$  和  $28 \sim 32^\circ\text{C}$ , 与京津冀地区(柴东红等, 2017)雷暴大风在 6—9 月 K 指数 25%~75% 值大小基本相当; 同时, 在高空冷涡和高空低槽背景下的 K 指数 25% 分位值, 分别为  $28$  和  $31^\circ\text{C}$ , 均值分别为  $32$  和  $34^\circ\text{C}$ , 与华北地区(严仕尧等, 2013)高空槽前 K 指数均值  $33^\circ\text{C}$  数值基本相当。总体来看, 在渤海西部雷雨大风发

生前, K 指数的阈值有一定的代表性, 将 25% 分位值作为阈值, 且此阈值与华北地区的阈值差别不大。

### 3.2.6 沙氏指数

SI 也是表征大气层结稳定度的参数, 一般 SI 负值越大表示气层越不稳定。对 2011—2016 年 6—9 月渤海西部雷雨大风发生前 SI 逐月和天气型统计(图 6g), 6—9 月 SI 的 75% 分位值分别为  $-0.1$ 、 $-0.7$ 、 $1.0$  和  $-0.6^\circ\text{C}$ , 高空冷涡和高空低槽背景下的 75% 分位值分别为  $1.5$  和  $-0.7^\circ\text{C}$ ,  $\text{SI} < 0^\circ\text{C}$  的过程量, 在 6 月和 8 月仅占到 50% 左右, 总体来看, 在渤海西部雷雨大风发生前, SI 指示性不明显。

### 3.2.7 小结

通过以上讨论和分析发现, 渤海西部出现雷雨大风前, LI、WINDEX、BCAPE 和 0~3 km 垂直风切变比华北陆地更明显, 具有较好的指示意义。同时, K 指数的预报参考阈值与华北陆地基本相当, 但也略有不同, 如 7 月阈值比陆地略偏大, 8 月阈值比陆地略偏小。分别给出渤海西部 6—9 月和高空冷涡、高空低槽背景下, LI、WINDEX、BCAPE、0~3 km 垂直风切变、3~6 km 垂直风切变和 K 指数的阈值, 为渤海西部雷雨大风预报提供参考依据, 具体阈值如表 2 所示。

表 2 渤海西部雷雨大风强对流参数参考阈值

Table 2 Convective parameter threshold of thunderstorm and gale in western Bohai Sea

		BCAPE/(J · kg <sup>-1</sup> )	LI/°C	WINDEX	0~3 km 垂直风切变/(m · s <sup>-1</sup> )	3~6 km 垂直风切变/(m · s <sup>-1</sup> )	KI/°C
逐月	6 月	>1200	<-4	≥21	≥11	≥9	≥28
	7 月	>2400	<-6	≥26	≥8	≥5	≥35
	8 月	>3500	<-7	≥34	≥8	≥6	≥27
	9 月	>1600	<-6	≥26	≥10	≥8	≥28
天气型	高空冷涡	>1500	<-5	≥25	≥11	≥7	≥28
	高空低槽	>2400	<-6	≥25	≥8	≥5	≥31

## 4 结 论

本文使用渤海西部七个海岛、平台、浮标站逐时观测资料等, 对 2011—2016 年 5—9 月渤海西部海区雷雨大风过程进行统计分析, 同时, 使用渤海西部逐时加密自动站数据与 850 hPa 以上北京和乐亭探空资料形成加密订正探空资料, 分析得到渤海西部雷雨大风对流参数预报指标。

(1) 共有 42 次过程, 风力以 8~9 级为主; 渤海

西部偏南比偏北海区监测到的过程平均偏多 10 次; 6 月过程最多, 其次是 7 月, 5 月最少; 受高空冷涡影响最多, 且其主要发生在 6 月, 占此类背景下总过程数的近 48%; 其次是高空低槽, 有 16 次过程, 此背景下在 6—9 月各月发生的过程数基本相当; 另外受副高边缘影响时很少, 占比仅在 7% 左右, 其主要发生在 7—8 月。

(2) 从雷达回波形态来看, 带状回波最多, 有 20 次过程(伴有阵风锋的有 11 次), 其中, 有 11 次过程发生在 6 月, 有 12 次过程受高空冷涡影响; 其次, 是

块状回波和弓形回波,分别有11和7次过程,主要发生在7—8月和6—7月,主要受高空冷涡和高空低槽影响。

(3)在雷雨大风发生前6~12 h,渤海西部会增温和减压,3 h负变压约为2 hPa,3 h正变温小于6℃,但仍比上游陆地站温度每经度低6℃;在雷雨大风发生前1~2 h,海陆上空冷暖性质发生转变,海上平台站比上游陆地站温度每经度高4℃以上,气压每经度低2 hPa。上游受雷暴影响形成的冷池与下游形成的温度梯度,对渤海西部雷雨大风的形成有一定的影响。

(4)最佳对流有效位能(BCAPE)、抬升指数(LI)、大风指数(WINDEX)和0~3 km垂直风切变相比华北陆地上的阈值更大,对渤海西部雷雨大风的预报具有一定的指示意义。其中,6—9月以及高空冷涡和高空低槽背景下的,BCAPE阈值分别大于1200、2400、3500、1600、1500和2400 J·kg<sup>-1</sup>;LI阈值分别小于-4、-6、-7、-6、-5和-6℃;WINDEX阈值分别大于等于21、26、34、26、25、25;0~3 km垂直风切变阈值分别大于等于11、8、8、10、11和8 m·s<sup>-1</sup>。

## 参考文献

- 柴东红,杨晓亮,吴紫煜,等,2017.京津冀地区雷暴大风天气的统计分析[J].暴雨灾害,36(3):193-199. Chai D H, Yang X L, Wu Z Y, et al, 2017. The statistical analysis of thunderstorm gales over Beijing-Tianjin-Hebei region[J]. Torrent Rain Dis, 36(3): 193-199(in Chinese).
- 陈明轩,王迎春,高峰,等,2011.基于雷达资料4DVar的低层热动力反演系统及其在北京奥运期间的初步应用分析[J].气象学报,69(1):64-78. Chen M X, Wang Y C, Gao F, et al, 2011. A low-level thermo-dynamical retrieval system based on the radar data 4DVar and a preliminary analysis of its applications in support of the Beijing 2008 Olympics[J]. Acta Meteor Sin, 69(1): 64-78(in Chinese).
- 陈明轩,肖现,高峰,2017.出流边界对京津冀地区强对流局地新生及快速增强的动力效应[J].大气科学,41(5):897-917. Chen M X, Xiao X, Gao F, 2017. Dynamical effect of outflow boundary on localized initiation and rapid enhancement of severe convection over Beijing-Tianjin-Hebei region[J]. Chin J Atmos Sci, 41(5): 897-917(in Chinese).
- 程月星,孙继松,戴高菊,等,2018.2016年北京地区一次雷暴大风的观测研究[J].气象,44(12):1529-1541. Cheng Y X, Sun J S, Dai G J, et al, 2018. Study on a thunderstorm event over Beijing in 2016[J]. Meteor Mon, 44(12): 1529-1541(in Chinese).
- 费海燕,王秀明,周小刚,等,2016.中国强雷暴大风的气候特征和环境参数分析[J].气象,42(12):1513-1521. Fei H Y, Wang X M, Zhou X G, et al, 2016. Climatic characteristics and environmental parameters of severe thunderstorm gales in China[J]. Meteor Mon, 42(12): 1513-1521(in Chinese).
- 高晓梅,俞小鼎,王令军,等,2018.鲁中地区分类强对流天气环境参量特征分析[J].气象学报,76(2):196-212. Gao X M, Yu X D, Wang L J, et al, 2018. Characteristics of environmental parameters for classified severe convective weather in central area of Shandong Province[J]. Acta Meteor Sin, 76(2): 196-212(in Chinese).
- 郭庆利,薛奕波,党英娜,2011.渤海海峡雷雨大风的多普勒雷达回波特征[J].海洋预报,28(1):13-18. Guo Q L, Xue Y B, Dang Y N, 2011. Doppler radar echo features of thunder-storm strong wind on Bohai Sea straits[J]. Mar Forecasts, 28(1): 13-18(in Chinese).
- 李燕,程航,吴纪平,2013.渤海大风特点以及海陆风力差异研究[J].高原气象,32(1):298-304. Li Y, Cheng H, Wu Q P, 2013. Study of the characteristic and difference between sea and land wind of Bohai[J]. Plateau Meteor, 32(1): 298-304(in Chinese).
- 李延江,景华,李江波,等,2013.一次渤海强对流天气系统监测与大风成因探讨[J].海洋预报,30(1):25-35. Li Y J, Jing H, Li J B, et al, 2013. The causes of a gale and the monitoring system for severe convective weather over the Bohai Bay[J]. Mar Forecasts, 30(1): 25-35(in Chinese).
- 刘彬贤,王彦,刘一玮,2015.渤海湾海风锋与阵风锋碰撞形成雷暴天气的诊断特征[J].大气科学学报,38(1):132-136. Liu B X, Wang Y, Liu Y W, 2015. Diagnostic features of thunderstorm events triggered by collision between sea breeze front and gust front over Bohai Bay[J]. Trans Atmos Sci, 38(1): 132-136(in Chinese).
- 苗春生,宋萍,王坚红,等,2015.春夏季节黄河气旋经渤海发展时影响因子对比研究[J].气象,41(9):1068-1078. Miao C S, Song P, Wang J H, et al, 2015. Comparative study of impact factors of the Yellow River cyclones over the Bohai Sea in spring and summer[J]. Meteor Mon, 41(9): 1068-1078(in Chinese).
- 秦丽,李耀东,高守亭,2006.北京地区雷暴大风的天气-气候学特征研究[J].气候与环境研究,11(6):754-762. Qin L, Li Y D, Gao S T, 2006. The synoptic and climatic characteristic studies of thunderstorm winds in Beijing[J]. Climatic Environ Res, 11(6): 754-762(in Chinese).
- 盛春岩,李建华,范苏丹,2014.地形及下垫面对渤海大风影响的数值研究[J].气象,40(11):1338-1344. Sheng C Y, Li J H, Fan S D, 2014. Numerical study of terrain and underlying surface effect on Bohai Sea gale[J]. Meteor Mon, 40(11): 1338-1344(in Chinese).
- 宋晓姜,荆建勇,王彰贵,2013.渤海一次强阵性雷雨大风过程的诊断分析[J].海洋预报,30(2):22-29. Song X J, Xing J Y, Wang Z G, 2013. A strong convection weather in the Bohai Sea[J]. Mar Forecasts, 30(2): 22-29(in Chinese).
- 苏涛,苗峻峰,韩芙蓉,2016.海风雷暴的观测分析和数值模拟研究进展[J].气象科技,44(1):47-54. Su T, Miao J F, Han F R, 2016. An overview of observational and numerical studies of sea breeze

- thunderstorms[J]. Meteor Sci Technol, 44(1): 47-54 (in Chinese).
- 孙继松,戴建华,何立富,等,2014. 强对流天气预报的基本原理与技术方法——中国强对流天气预报手册[M]. 北京:气象出版社:13-18,52-58,171-181. Sun J S, Dai J H, He L F, et al, 2014. The Basic Principle and Technical Method of Severe Convective Weather Forecast[M]. Beijing: China Meteorological Press: 13-18, 52-58, 171-181 (in Chinese).
- 孙密娜,朱男男,王亚男,2016. 近10年渤海近海A平台大风特征分析[J]. 海洋通报, 35(4): 367-379. Sun M N, Zhu N N, Wang Y N, 2016. Characteristics of gales at Platform A of Bohai offshore in recent ten years[J]. Mar Sci Bull, 35(4): 367-379 (in Chinese).
- 王彦,唐熠,赵金霞,等,2009. 天津地区雷暴大风天气雷达产品特征分析[J]. 气象, 35(5): 91-96. Wang Y, Tang Y, Zhao J X, et al, 2009. Statistical characters of Doppler weather radar data on thunderstorms[J]. Meteor Mon, 35(5): 91-96 (in Chinese).
- 王彦,于莉莉,朱男男,等,2011. 渤海湾海风锋与雷暴天气[J]. 高原气象, 30(1): 245-251. Wang Y, Yu L L, Zhu N N, et al, 2011. Sea breeze front in Bohai Bay and thunderstorm weather[J]. Plateau Meteor, 30(1): 245-251 (in Chinese).
- 肖现,陈明轩,高峰,等,2015. 弱天气系统强迫下北京地区对流下山演变的热动力机制[J]. 大气科学, 39(1): 100-124. Xiao X, Chen M X, Gao F, et al, 2015. A thermodynamic mechanism analysis on enhancement or dissipation of convective systems from the mountains under weak synoptic forcing[J]. Chin J Atmos Sci, 39(1): 100-124 (in Chinese).
- 许爱华,孙继松,许东蓓,等,2014. 中国中东部强对流天气的天气形势分类和基本要素配置特征[J]. 气象, 40(4): 400-411. Xu A H, Sun J S, Xu D B, et al, 2014. Basic synoptic situation classification and element character of severe convection in China[J]. Meteor Mon, 40(4): 400-411 (in Chinese).
- 严仕尧,李昀英,齐琳琳,等,2013. 华北产生雷暴大风的动力热力综合指标分析及应用[J]. 暴雨灾害, 32(1): 17-23. Yan S Y, Li Y Y, Qi L L, et al, 2013. Analysis and application of thermo-dynamical and dynamical indexes associated with thunderstorm gale in North China[J]. Torrent Rain Dis, 32(1): 17-23 (in Chinese).
- 杨璐,陈明轩,孟金平,等,2018. 北京地区雷暴大风不同生命期内的雷达统计特征及预警提前量分析[J]. 气象, 44(6): 802-813. Yang L, Chen M X, Meng J P, et al, 2018. Radar statistical characteristics and warning lead analysis of thunderstorm gales in different life periods in Beijing[J]. Meteor Mon, 44(6): 802-813 (in Chinese).
- 俞小鼎,周小刚,王秀明,2012. 雷暴与强对流临近天气预报技术进展[J]. 气象学报, 70(3): 311-337. Yu X D, Zhou X G, Wang X M, 2012. The advances in the nowcasting techniques on thunderstorms and severe convection[J]. Acta Meteor Sin, 70(3): 311-337 (in Chinese).
- 于志明,王骊驹,马东亮,2018. 渤海海洋气象灾害天气分型与预报指标研究[J]. 气象与环境学报, 34(1): 106-111. Yu Z M, Wang S Y, Ma D L, 2018. Study on weather classification and forecasting index of marine meteorological disasters in the Bohai Sea[J]. J Meteor Environ, 34(1): 106-111 (in Chinese).
- 章国材,2011. 强对流天气分析与预报[M]. 北京:气象出版社:75-84,166-176. Zhang G C, 2011. Analysis and Forecast of Severe Convective Weather[M]. Beijing: China Meteorological Press: 75-84, 166-176 (in Chinese).
- 中华人民共和国住房和城乡建设部,2012. 建筑结构荷载规范(GB5009—2012)[M]. 北京:中国建筑工业出版社:200. Ministry of Housing and Urban-Rural Construction of the People's Republic of China, 2012. Load Code for the Design of Building Structures (GB5009—2012)[M]. Beijing: China Construction Industry Press: 200 (in Chinese).