

朱男男, 熊秋芬, 胡田田, 等. 近 10 年黄、渤海海域入海气旋的统计特征和加强原因分析[J]. 海洋学报, 2021, 43(10): 50–60, doi:10.12284/hyxb2021089

Zhu Nannan, Xiong Qiufen, Hu Tiantian, et al. Statistic characteristics and strengthening analysis of cyclones over the Yellow Sea and the Bohai Sea in recent 10 years[J]. Haiyang Xuebao, 2021, 43(10): 50–60, doi:10.12284/hyxb2021089

近 10 年黄、渤海海域入海气旋的统计特征和加强原因分析

朱男男^{1,3}, 熊秋芬², 胡田田¹, 马建铭¹, 王亚男¹

(1. 天津海洋中心气象台, 天津 300074; 2. 中国气象局气象干部培训学院, 北京 100081; 3. 天津市海洋气象重点实验室, 天津 300074)

摘要: 利用 2008–2018 年逐小时自动站资料、常规地面高空观测资料、NCEP-FNL 资料, 统计黄、渤海 7 级及以上气旋大风过程, 围绕气旋加深率和气压梯度讨论气象因子与气旋强度和发展关系, 根据 Petterssen 地面气旋发展公式讨论温度平流、涡度平流和非绝热加热在气旋中的作用。结果表明: (1) 70.5% 气旋入海后加强, 14.7% 成为爆发性气旋, 17.6% 气旋入海过程强度不变, 11.7% 气旋入海后减弱。影响黄、渤海的温带气旋过程主要发生在秋季, 春冬季次之, 夏季一次也没有出现过。入海发展的气旋多位于 200 hPa 高空急流出口左侧或者分流辐散区, 入海减弱的气旋多位于高空急流出口右侧。(2) 影响黄、渤海的气旋有 3 类: 自西北向东南移动的蒙古气旋 (17.6%); 自西向东移动的黄河气旋 (49%); 自西南向东北移动的江 (黄) 淮气旋 (33.4%)。江 (黄) 淮气旋在秋季容易发展为爆发性气旋。黄河气旋和蒙古气旋入海后最大风区域通常出现在气旋的西北象限 (或偏西象限), 江 (黄) 淮气旋最大风区域出现在气旋的东南象限。(3) 温度平流是气旋入海发展最重要的物理量因子, 温度平流对气旋入海发展比对气旋强度更敏感。5 次爆发性气旋过程中温度平流和涡度平流均高于其他气旋过程。非绝热加热与气旋强度的相关性较强, 与气旋发展相关性弱。(4) 江 (黄) 淮气旋过程中温度平流和非绝热加热较强, 黄河气旋过程中涡度平流较强, 涡度平流和非绝热加热对蒙古气旋的作用较弱。

关键词: 入海气旋; 统计分析; 爆发性气旋; 温度平流; 涡度平流; 非绝热加热

中图分类号: P732

文献标志码: A

文章编号: 0253-4193(2021)10-0050-11

1 引言

温带气旋是影响我国黄、渤海海域的主要天气系统之一。温带气旋移经黄、渤海后往往形成难以预报的突发性致灾大风, 尤其是当温带气旋入海后快速发展成爆发性气旋, 它的破坏力不亚于台风, 入海温带气旋 (以下简称气旋) 引发的突发性大风对海上作业和船舶运输影响很大。受入海气旋影响的海难案

例较多, 2013 年 11 月 24 日江淮气旋入海后快速发展形成爆发性气旋, 导致黄、渤海海域出现 9~10 级大风, 受风浪影响渤海海峡发生了两起严重的沉船事故, 共计 26 名船员遇难。2013 年 3 月 18 日渤海海域受到冷空气与气旋的共同影响, 渤海出现 9 级大风, 导致轮船“阳光新港”号在龙口港北部沉没, 共计 14 人遇难。2007 年 3 月 3–6 日黄、渤海地区受入海气旋影响, 发生一次严重的风浪和风暴潮灾害, 给天

收稿日期: 2020-04-13; 修订日期: 2020-09-07。

基金项目: 国家自然科学基金 (41675046); 天津科委基金项目 (16JCBJC21500); 中国气象局预报员专项 (CMAYBY2019-008, CMAYBY2020-006); 国家重点研发计划重点专项 (2019YFC1510100)。

作者简介: 朱男男 (1980—), 女, 吉林省长春市人, 主要从事海洋预报和研究工作。E-mail: 18296759@qq.com

津、河北、辽宁、山东等沿海各省市带来巨大的经济损失,直接经济损失达到40亿元,12人死亡。

早期对温带气旋的研究针对西北太平洋区域^[1-3],关注气旋发生发展过程中强度变化及其引发灾害性天气^[4-9],尤其是针对暴雨、风暴潮和大风等灾害成因分析^[10-12]。学者们分别从诊断分析角度^[13-16]、能量角度^[17]、位涡角度^[18-19]对气旋发生发展进行机理和特征结构进行研究,认为温度平流、涡度平流、位势涡度和非绝热加热在气旋发展变化中具有重要作用。近年来,温带气旋对我国近海的影响逐渐被重视,爆发性气旋个例不仅出现在远海,也可以出现在黄、渤海海域^[20]。尹尽勇等^[21]和黄彬等^[22-23]对移经渤海快速发展的气旋进行物理量诊断分析。也有学者探讨海洋下垫面对气旋的作用^[24-27],并利用模式修改渤海地形及下垫面对冷空气大风影响的进行研究^[28]。上述对温带气旋研究主要是针对个例进行分析,对黄、渤海气旋统计特征进行系统性研究的较少,而气旋入海后往往形成突发性灾害大风,在海洋预报中风力经常出现漏报,仅从气压梯度来判断风力等级会导致预报失败。因此,研究入海气旋统计特征和入海后加强的原因,对提高预报准确率具有一定的帮助。

2 资料和方法

本文利用逐小时自动站资料统计2008-2018年出现在渤海、渤海海峡、黄海北部和黄海中部7级以上大风过程,根据海洋预报业务标准,海洋平台自动站连续3h风力超过7级即为一次大风过程。再利用地面观测资料筛选由气旋引起的大风过程。海平面气压场上2.5hPa间距的等压线有3个以上闭合中心且气旋中心经过黄、渤海海域认为是一次黄、渤海入海气旋过程。利用高空观测资料和地面观测资料分析和计算入海气旋过程中的10项气象因子。根据Petterssen气旋发展公式^[29]讨论温度平流、涡度平流和非绝热加热在气旋强度和发展中的作用,利用NCEP-FNL资料计算温度平流、涡度平流和非绝热加热等物理量。

3 入海气旋统计分析

3.1 气旋加深率与气压梯度

2008-2018年黄、渤海共出现34次7级以上气旋大风过程(表1),文中分别统计10项气象因子:200hPa高空急流、高空(500hPa)低空(850hPa)影响系统、地面气旋中心强度、移动路径、入海后是否加强、气旋加深率、最小气压梯度、地面气旋中心与500hPa低涡(槽)系统距离(Z_{500})、地面气旋中心与850hPa低

涡、切变线系统距离(Z_{850})。文中计算气旋入海后发展最强时刻的气旋加深率,采用Yoshida和Asuma^[30]的公式计算12h气旋加深率,具体方法如下:

$$R_{SLP} = \left(\frac{P_{t-6} - P_{t+6}}{12} \right) \left(\frac{\sin 60^\circ}{\sin \frac{\varphi_{t-6} + \varphi_{t+6}}{2}} \right), \quad (1)$$

式中, R_{SLP} 为12h气旋加深率,单位:hPa/h; t 为分析时间; $t-6$ 为 t 时间6h前的时刻; $t+6$ 为 t 时间6h后的时刻; P 为气旋中心海平面气压; φ 为气旋中心纬度。本文主要研究区域为渤海、渤海海峡、黄海北部和黄海中部海域,即 $33^\circ \sim 43^\circ N$, $115^\circ \sim 128^\circ E$ 海洋区域。

文中计算了黄、渤海入海气旋的气旋加深率,34次气旋过程中有24次气旋入海是加强的(图1a),气旋加深率为正值,占总数的70.5%,6次气旋入海过程强度不变,气旋加深率为0,占总数的17.6%,4次过程入海后减弱,气旋加深率为负值,占总数的11.7%,气旋加深率达到1为爆发性气旋,34次过程中有5次爆发性气旋过程,占总数的14.7%。70.5%气旋入海后会加强。

气压梯度是反映气旋强度的量,气压梯度大则气旋强度大,气压梯度指向气旋中心^[31], $G_n = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial n}$,其中 $\rho = 1.2923 \text{ kg/m}^3$,沿气旋中心法向方向的两个等压线最小距离来反算最小气压梯度,文中简称气压梯度。文中计算34个过程的气压梯度(图1a),气压梯度与气旋加深率走向较为一致,但有2次气压梯度较强过程气旋加深率却较低,第13次过程中气压梯度较高,而气旋加深率为负值,即气旋入海前强度较大,入海后强度减弱。第21次过程气压梯度较强,而气旋加深率为0,即气旋入海前强度较大,入海后强度无变化。可见较强的气旋入海后不一定会继续发展。

3.2 海平面气压和高空影响系统

统计气旋经黄、渤海海平面最低气压如图1b所示,柱状图上的数值为气旋发生月份,春季(3-5月)有11次过程,气压值在985~1010hPa之间,夏季(6-8月)没有出现气旋过程,秋季(9-11月)有12次过程,气压值在996~1020hPa之间,冬季(12月至翌年2月)有11次过程,气压值在1003~1028hPa之间。气旋中心海平面气压最低值出现在5月份,为985hPa。气旋中心海平面气压最高值出现在1月份,为1028hPa。冬季的平均气压值高于秋季和春季,春季平均气压值最低,夏季未出现气旋过程。夏季海洋是冷源,冷的下垫面不利于气旋发展^[32]。

入海发展的气旋多位于200hPa高空急流出口左

表 1 黄、渤海气旋气象因子统计

Table 1 Statistics of meteorological factors of the cyclones in the Yellow Sea and the Bohai Sea

| 日期 | 200 hPa 高空急流 | 影响系统 | 地面气旋 中心强度/hPa | 移动路径 | 入海后是 否加强 | 气旋加深 率/(hPa·h ⁻¹) | 最小气压梯度/ (hPa·km ⁻¹) | Z ₈₅₀ /km | Z ₅₀₀ /km |
|--------------------|-----------------|--------|------------------|--------|-------------|----------------------------------|------------------------------------|----------------------|----------------------|
| 1)2010年4月26日-27日 | 出口左侧 | 槽前/低涡 | 1 003 | 自西向东 | 增强 | 0.56 | 1.79 | 148 | 277 |
| 2)2010年10月2日-3日 | 出口左侧 | 槽前/低涡 | 1 010 | 自西向东 | 增强 | 0.43 | 0.98 | 279 | 378 |
| 3)2010年11月7日-8日 | 出口左侧 | 槽前/切变 | 1 013 | 自西北向东南 | 增强 | 0.275 | 1.25 | 423 | 550 |
| 4)2010年11月11日-12日 | 出口左侧 | 槽前/切变 | 1 008 | 自西南向东北 | 增强 | 0.539 | 2.5 | 275 | 353 |
| 5)2010年12月2日-3日 | 出口左侧 | 浅槽/低涡 | 1 013 | 自西向东 | 不变 | 0 | 1.39 | 678 | 1100 |
| 6)2010年12月10日-11日 | 出口左侧 | 槽前/切变 | 1 003 | 自西北向东南 | 不变 | 0 | 3.13 | 268 | 460 |
| 7)2011年11月22日-23日 | 出口左侧 | 槽前/切变 | 1 020 | 自西向东 | 增强 | 0.43 | 1.92 | 334 | 461 |
| 8)2012年09月27日-28日 | 出口左侧 | 槽前/低涡 | 1 015 | 自西向东 | 增强 | 0.389 | 1.25 | 346 | 471 |
| 9)2012年11月3日-5日 | 出口左侧 | 低涡/切变 | 1 010 | 自西向东 | 增强 | 0.573 | 2.78 | 173 | 280 |
| 10)2012年11月10日-13日 | 出口左侧 | 低涡/低涡 | 1 003 | 自西南向东北 | 增强 | 1.028 | 4.55 | 90 | 385 |
| 11)2012年12月5日 | 出口左侧 | 低涡/切变 | 1 018 | 自西向东 | 增强 | 0.599 | 1.34 | 523 | 744 |
| 12)2012年12月31日 | 出口左侧 | 浅槽/切变 | 1 018 | 自西向东 | 不变 | 0 | 0.93 | 859 | 1 142 |
| 13)2013年03月9日 | 出口右侧 | 槽前/切变后 | 998 | 自西北向东南 | 减弱 | -0.529 | 4.17 | 195 | 728 |
| 14)2013年05月27日-28日 | 出口右侧 | 槽前/低涡 | 1 000 | 自西南向东北 | 减弱 | -0.307 | 2.27 | 50 | 80 |
| 15)2013年11月24日-25日 | 出口左侧 | 槽前/低涡 | 998 | 自西南向东北 | 增强 | 1.776 | 3.13 | 135 | 371 |
| 16)2014年05月2日 | 出口右侧 | 槽前/切变 | 1 008 | 自西向东 | 增强 | 0.187 | 2.5 | 643 | 843 |
| 17)2014年05月4日 | 出口左侧 | 槽前/低涡 | 1 010 | 自西向东 | 增强 | 0.135 | 1.37 | 540 | 800 |
| 18)2014年12月19日 | 出口左侧 | 槽前/切变 | 1 020 | 自西北向东南 | 不变 | 0 | 1.4 | 400 | 600 |
| 19)2015年04月19日 | 辐散分流区 | 槽前/低涡 | 1 005 | 自西南向东北 | 增强 | 0.472 | 0.96 | 275 | 1 376 |
| 20)2015年10.01日 | 辐散分流区 | 槽前/切变 | 1 005 | 自西南向东北 | 增强 | 1.227 | 2.78 | 80 | 300 |
| 21)2015年11月7日 | 急流轴下部 | 浅槽/弱低涡 | 1 015 | 自西向东 | 不变 | 0 | 4.81 | 467 | 1 305 |
| 22)2016年02月13日 | 出口左侧 | 槽前/低涡 | 1 008 | 自西南向东北 | 增强 | 0.629 | 2.1 | 250 | 330 |
| 23)2016年04月16日 | 辐散分流区 | 槽前/低涡 | 995 | 自西南向东北 | 增强 | 0.944 | 3.57 | 145 | 276 |
| 24)2016年05月2日-3日 | 辐散分流区 | 低涡/低涡 | 985 | 自西南向东北 | 增强 | 1.319 | 4.81 | 90 | 325 |
| 25)2016年10月24日-25日 | 出口右侧 | 浅槽/弱切变 | 1 010 | 自西向东 | 增强 | 0.1 | 0.83 | 170 | 2 700 |
| 26)2016年12月8日 | 出口左侧 | 浅槽/切变 | 1 013 | 自西北向东南 | 增强 | 0.09 | 1.71 | 200 | 323 |
| 27)2017年01月19日 | 出口左侧 | 槽前/切变 | 1 028 | 自西向东 | 增强 | 0.789 | 3.01 | 90 | 400 |
| 28)2017年03月4日 | 辐散分流区 | 槽前/低涡 | 1 000 | 自西南向东北 | 增强 | 0.906 | 4.9 | 180 | 607 |
| 29)2018年02月13日 | 出口右侧 | 槽前/切变 | 1 010 | 自西向东 | 减弱 | -0.103 | 1.56 | 348 | 756 |
| 30)2018年11月8日 | 辐散分流区 | 槽前/切变 | 1 008 | 自西南向东北 | 增强 | 1.199 | 4.3 | 86 | 163 |
| 31)2009年12月4日 | 出口左侧 | 槽前/切变 | 1 013 | 自西向东 | 增强 | 0.431 | 2.31 | 163 | 378 |
| 32)2009年12月29日 | 出口右侧 | 浅槽/切变 | 1 013 | 自西北向东南 | 不变 | 0 | 0.124 | 197 | 423 |
| 33)2008年04月9日 | 出口右侧 | 低涡/低涡 | 1 000 | 自西向东 | 增强 | 0.156 | 2.149 | 259 | 421 |
| 34)2008年04月25日 | 出口右侧 | 槽前/低涡 | 1 003 | 自西向东 | 减弱 | -0.124 | 1.769 | 152 | 313 |

注: Z₅₀₀是500 hPa系统与地面气旋中心距离, Z₈₅₀是850 hPa系统与地面气旋中心距离

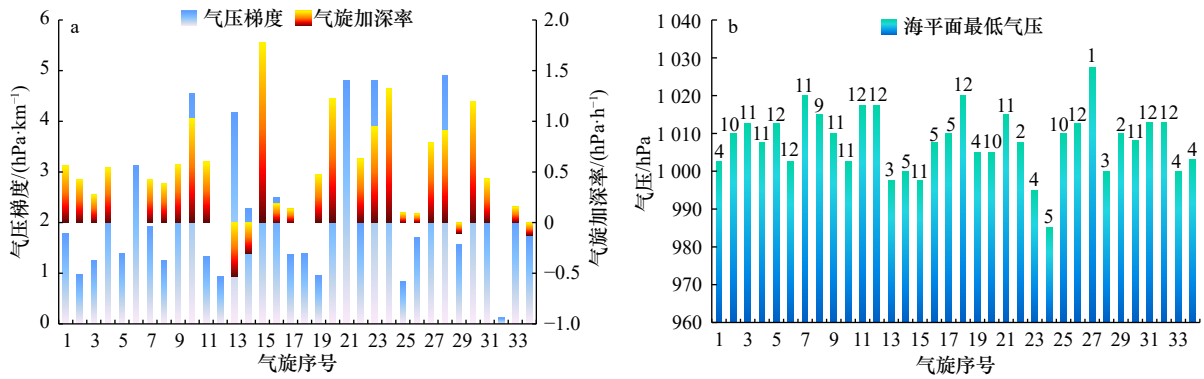


图1 34次过程气旋加深率和气压梯度(a), 34次过程地面中心最低气压(b)

Fig. 1 Cyclone deepening rates and barometric gradient (a), sea level minimum pressure in 34 cyclones processes (b)

柱状图上数字为气旋发生月份

The number at the top of the histogram is the month in which the cyclone occurred

侧或者分流辐散区(表1),这些区域对应对流层中上层强辐散区,高空强烈辐散有利于地面补偿性减压,促使低层气旋快速发展^[33]。气旋加深率为负的4次过程位于高空急流出口右侧,对应高空辐合区,不利于地面气旋发展。气旋入海过程中高低空系统多呈后倾结构,发展中的气旋位于高空槽前,位于高空槽后的地面气旋入海后往往减弱,500 hPa和850 hPa同时发展成低涡的深厚系统更容易入海快速发展,其中有5次发展为爆发性气旋,见序号10、15、20、24、30过程加深率。

3.3 影响黄、渤海海域入海气旋路径分类

按照气旋的生成地分类,影响黄、渤海海域的气旋分为3类,第1类是蒙古气旋,自西北向东南移动影响黄、渤海,蒙古气旋占总数的17.6%(图2a);第2类是黄河气旋,自西向东移动影响黄、渤海海域,黄河气旋占总数的49%(图2b),是影响频次最多的一类;第3类是江淮气旋(包括黄淮气旋),此类气旋生成于江淮流域,自西南向东北移动,占总数的33.4%(图2c)。

表1中5次爆发性气旋均为江(黄)淮气旋,4次发生在秋季,1次发生在春季。

3.4 气旋风场统计特征

气旋入海后往往形成突发性大风,不同气旋的大风出现区域不同,同一气旋的不同象限出现的风力等级不同。文中统计34次黄、渤海气旋过程最大风出现区域,按照最大风出现区域主要分为两种类型,分别为西北(偏西)大风型和东南(偏东)大风型。西北大风型出现在秋冬季节(9月至翌年2月),气旋最大风区域通常出现在气旋的西北象限(或偏西象限),即气旋中心及冷锋后部。影响黄、渤海海域风向多为西北大风(图3a至图3c),偶尔会出现偏西大风,西北大风型的主要影响系统是蒙古气旋和黄河气旋。文中列举2016年2月13日、2012年11月11日、2013年2月9日西北大风型气旋过程,这些气旋取西北或偏西路径影响黄、渤海海域,最大风速带出现在气旋西北或偏西象限。东南(偏东)型大风多出现在春季(3-5月),最大风区域出现在气旋的东南象限或偏东

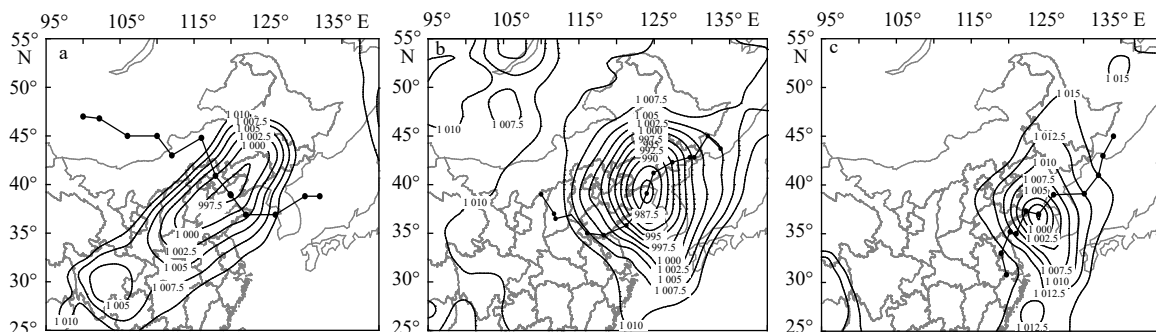


图2 蒙古气旋(a)、黄河气旋(b)、江淮气旋(c)路径和海平面气压(单位: hPa)

Fig. 2 Mongolian cyclone (a), Yellow River cyclone (b), Changjiang-Huaihe cyclone (c) tracks and sea level pressure (unit: hPa)

a. 2013年3月9日西北-东南路径; b. 2016.05.02 西移路径; c. 2013.11.24 西南-东北路径

a. Northwest-southeast path on March 9, 2013; b. westward path on May 2, 2016; c. southwest-northeast path on November 24, 2013

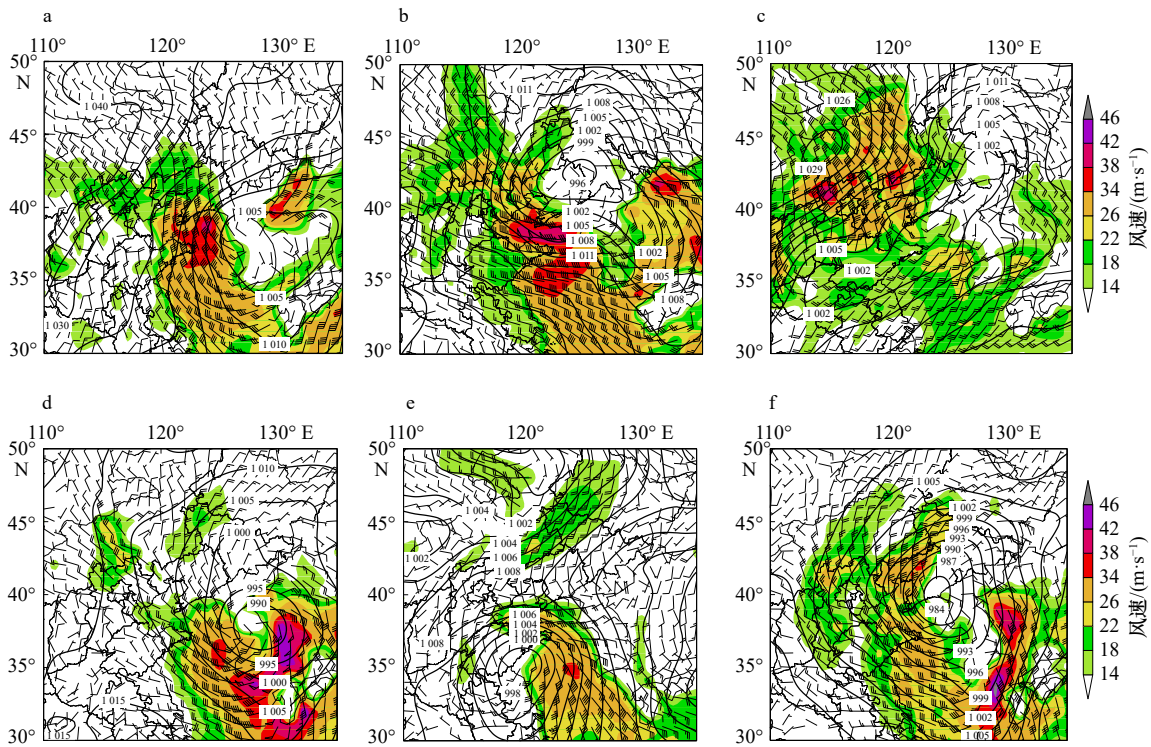


图3 西北大风个例(a-c)和东南大风个例(d-f)的海平面气压场(单位: hPa)和10 m风场(风向杆, 阴影区为风速14 m/s以上)

Fig. 3 Sea level pressure (shade, unit: hPa) and 10 m-wind (wind bar) in northwest gale cases (a-c) and southeast wind cases (d-f)

象限,影响黄、渤海海域风向多为东南风或偏东风(图3d至图3f),影响系统为江淮气旋或黄淮气旋,当气旋中心移经黄海时,黄海海域往往出现较强东南风,东南风风力会超过气旋后部的西北风,此种类型的大风称为东南(偏东)大风型。文中列举2016年4月16日、2013年5月27日、2016年5月3日东南大风型气旋过程,图中可见最大风速带出现在气旋的东南象限。这类气旋由西南向东北移动时,黄海海域受东南大风影响,渤海海域受偏东风或东北风影响,如果气旋较强且在黄海移动缓慢,长时间较强偏东风配合天文高潮位将在黄、渤海沿岸形成风暴潮,江(黄)淮气旋是黄、渤海沿岸风暴潮形成的主要影响系统之一^[34]。

3.5 高低空系统与地面气旋的距离

文中气旋过程高低空配置皆为后倾结构,为分析高低空系统对地面气旋的影响,计算了34次过程500 hPa低涡或槽线与地面气旋之间的平面距离(Z_{500}),850 hPa低涡或切变线与地面气旋之间的平面距离(Z_{850})。 Z_{500} 或 Z_{850} 就是在500 hPa或850 hPa系统和地面海平面气压场的叠加图中,计算槽线或者低涡中心到地面气旋中心的最短距离。对比34次过程的 Z_{500} 、 Z_{850} 和气旋加深率的曲线(图4a,图4b), Z_{500} 和 Z_{850} 高值与气旋加深率低值相对应,曲线走向完全相

反, Z_{500} 与气旋加深率之间呈负相关。因而,地面气旋与500 hPa和850 hPa系统的距离越小,地面气旋越容易发展。其中5次爆发性气旋的 Z_{500} 和 Z_{850} 分布在500 km和200 km以内。为了具体说明 Z_{500} 和 Z_{850} 对气旋强度和气旋发展变化的作用,分别计算 Z_{500} 和 Z_{850} 与气压梯度和气旋加深率的相关系数(图4c,图4d)。

对34个样本的相关系数进行 t 检验, Z_{850} 与气旋加深率的相关系数全部通过显著水平 $\alpha=0.01$ 信度检验, Z_{850} 与气压梯度的相关系数70%的样本通过了显著水平 $\alpha=0.01$ 信度检验, Z_{500} 与气旋加深率的相关系数样本85%通过了显著水平 $\alpha=0.01$ 信度检验, Z_{500} 与气压梯度的相关系数检验中仅有3例通过了显著水平 $\alpha=0.01$ 信度检验。

Z_{500} 与气压梯度的相关系数明显大于 Z_{850} 与气压梯度的相关系数,由于相关系数为负, Z_{850} 与地面气压梯度的相关性更强,即 Z_{850} 与地面气旋强度相关性高于 Z_{500} 。同理可证, Z_{850} 与气旋加深率的相关性更强,即 Z_{850} 与地面气旋发展相关性高于 Z_{500} 。综上所述,850 hPa系统与地面气旋的距离和地面气旋发展的相关性最高。850 hPa系统与地面气旋越近,地面气旋越强,气旋越容易发展。 Z_{850} 对预报气旋的发展有一定的参考价值。

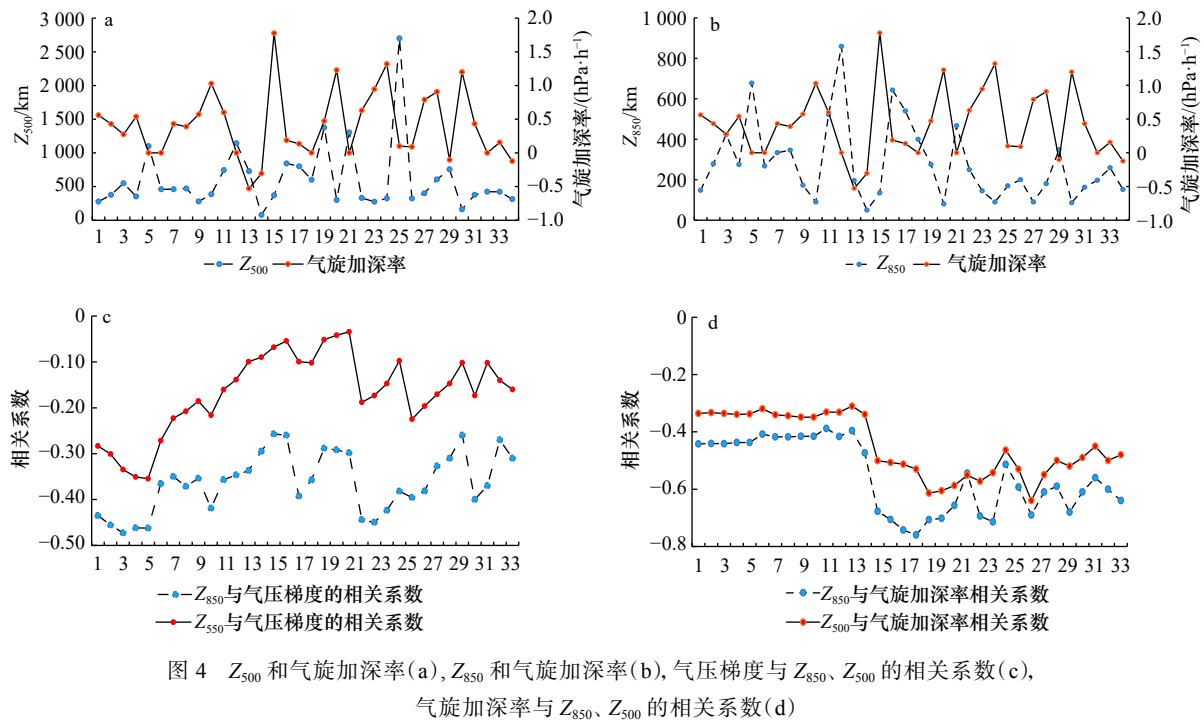


图4 Z_{500} 和气旋加深率(a), Z_{850} 和气旋加深率(b), 气压梯度与 Z_{850} 、 Z_{500} 的相关系数(c), 气旋加深率与 Z_{850} 、 Z_{500} 的相关系数(d)

4 气旋发展原因分析

4.1 物理量在气旋强度和发展中的作用

70%的气旋入海后加强,下面讨论气旋入海发展原因。根据 Petterssen 气旋发展公式,1 000 hPa 涡度局地变化能够表示地面气旋发展状况,以此公式探讨气旋入海发展原因,具体如下

$$\frac{\partial \zeta_{1000}}{\partial t} = -\mathbf{V} \cdot \nabla(f + \zeta)_{500} - \frac{R}{f} \ln \frac{1000}{500} \times \nabla^2 \left[\overline{-\mathbf{V} \cdot \nabla T} + (\Gamma_a - \Gamma) \overline{\omega} + \frac{\overline{Q}}{c_p} \right], \quad (2)$$

式中, $\frac{\partial \zeta_{1000}}{\partial t}$ 为 1 000 hPa 涡度局地变化项; \mathbf{V} 为风矢量; f 为地转涡度; R 为气体常数; T 为温度; Γ 为温度递减率; ω 为垂直速度; Q 为加热率; c_p 为定压比热。等式右侧分别为 500 hPa 绝对涡度平流项(右端第 1 项); 500~1 000 hPa 的拉普拉斯项之和,即温度平流项(右端第 2 项); 绝热项(右端第 3 项)和非绝热加热项(右端第 4 项)。右端第 3 项在物理意义上有缺陷,这里不做讨论。因此只考虑 500 hPa 绝对涡度平流、500~1 000 hPa 温度平流的拉普拉斯和非绝热加热拉普拉斯项。文中简称为涡度平流项、温度平流项和非绝热加热项。

为了讨论气旋入海后的发展原因,文中计算气旋入海后影响黄、渤海区域的物理量,分别是 500~

1 000 hPa 温度平流累加值、500 hPa 涡度平流和 850 hPa 非绝热加热作用。非绝热加热作用采用 Emanuel 等^[35]和 Raymond^[36]的方法,加热率公式为

$$\dot{\theta} = \frac{d\theta}{dt} = \omega \left(\frac{\partial \theta}{\partial p} - \frac{\gamma_m}{\gamma_d} \frac{\theta}{\theta_e} \frac{\partial \theta_e}{\partial p} \right), \quad (3)$$

式中, γ_m 为湿绝热递减率; γ_d 为干绝热递减率; θ 为位温; θ_e 为相当位温; ω 为垂直速度; p 为气压; t 为时间。

气压梯度代表气旋入海后的强度,气旋加深率代表气旋入海后发展变化,通过上述 3 个物理量与气压梯度和气旋加深率的相关性分析,讨论物理量在入海后气旋强度和气旋发展中的作用。图 5a 为 34 次过程温度平流、气压梯度和气旋加深率曲线。图中可见气旋加深率、气压梯度和温度平流走势基本一致,其中 5 次爆发性气旋过程中温度平流均强于其他气旋过程。但有 2 次过程对应关系不好,其中第 13 次过程气压梯度较强,温度平流较弱,气旋加深率为负,是一次入海减弱的气旋过程,温度平流弱是其入海减弱的原因之一。第 21 次过程也出现类似情况,温度平流弱,气压梯度大,气旋加深率接近于 0。由于温度平流弱,气旋入海有强度没有变化。气压梯度与 3 个物理量的相关系数全部通过了显著水平 $\alpha=0.01$ 信度检验,气旋加深率与温度平流和涡度平流的相关系数全部通过了显著水平 $\alpha=0.01$ 信度检验,气旋加深率与非绝热加热的相关系数有 6 个样本未通过显

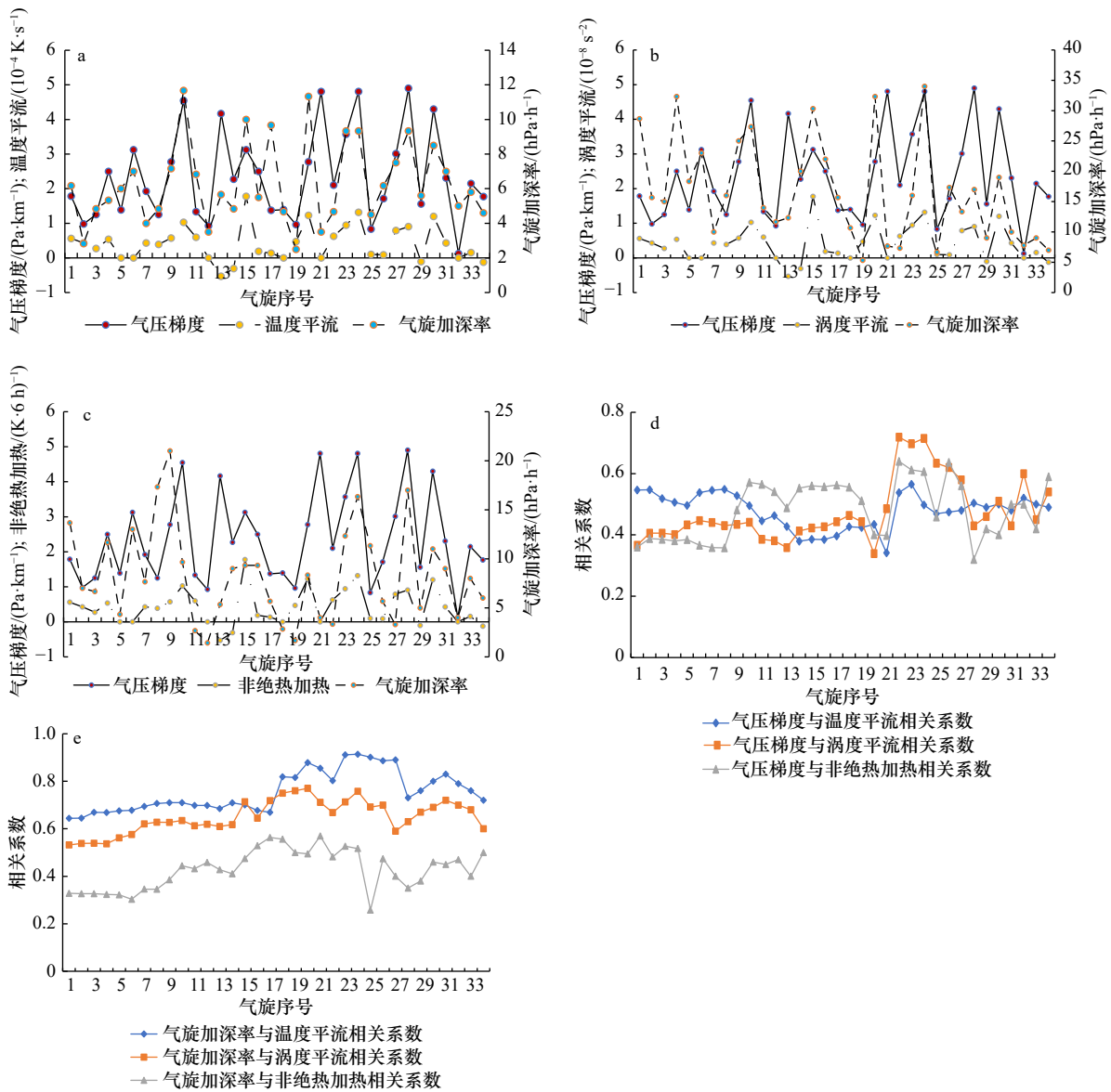


图5 34次气旋过程气压梯度、气旋加深率和温度平流(a), 气压梯度、气旋加深率和涡度平流(b), 气压梯度、气旋加深率和非绝热加热(c), 气旋梯度与温度平流、涡度平流和非绝热加热的相关系数(d), 气旋加深率与温度平流、涡度平流和非绝热加热的相关系数(e)

Fig. 5 Distribution of barometric gradient, cyclone deepening rate and temperature advection in 34 cyclone processes (a); distribution of barometric gradient, cyclone deepening rate and vorticity advection in 34 cyclones processes (b); distribution of barometric gradient, cyclone deepening rate and diabatic heating (c), correlation coefficient between temperature advection, vorticity advection, diabatic heating and barometric gradient (d); correlation coefficient between temperature advection, vorticity advection, diabatic heating and cyclone deepening rate (e)

著水平 $\alpha=0.01$ 信度检验。从温度平流与气压梯度相关曲线看, 温度平流与气压梯度的相关系数主要集中在 $0.4 \sim 0.6$ 之间(图 5d), 温度平流与气旋加深率的相关系数在 $0.6 \sim 0.9$ 之间(图 5e), 气旋入海后温度平流与气旋加深率的相关性大于与气压梯度的相关系数, 温度平流对气旋发展比对气旋强度更敏感, 温度平流是 3 个因子中与气旋发展相关性最高的因子。

与温度平流相似, 涡度平流与气压梯度有两次对

应关系不好(图 5b), 分别是第 13 次和第 21 次过程, 涡度平流小, 气压梯度大。涡度平流和气旋加深率有 3 次对应关系不好, 分别是第 7、19、22 次过程, 涡度平流小, 气旋加深率大。涡度平流与气压梯度的相关系数在 $0.3 \sim 0.7$ 之间, 涡度平流与气旋加深率的相关系数高于与气压梯度的相关系数, 涡度平流对气旋发展比对气旋强度更敏感, 5 次爆发性气旋过程中

涡度平流均高于其他气旋过程。

非绝热加热与气压梯度和气旋加深率相关性不如温度平流和涡度平流(图5c),非绝热加热与气压梯度的相关系数在0.3~0.6之间,非绝热加热与气旋加深率的相关系数在0.2~0.5之间,非绝热加热与气压梯度的相关性大于与气旋加深率的相关性,非绝热加热与气旋强度的相关性较强,与气旋发展相关性弱。

综上所述,温度平流是气旋入海发展最重要的物理量因子。温度平流和涡度平流对气旋发展比对气旋强度相关性更高。在爆发性气旋过程中,温度平流和涡度平流均高于其他气旋过程。非绝热加热是气旋发展相关性最小的因子,非绝热加热对气旋强度比对气旋发展的相关性更强。

4.2 不同类型气旋的物理量作用

34次过程分别按照黄河气旋、蒙古气旋和江淮气旋归类,计算出气旋入海后发展时刻物理量平均值(表2),江淮气旋(黄淮气旋)的温度平流最高,黄河气旋和蒙古气旋温度平流接近。黄河气旋的涡度平流最高,蒙古气旋的涡度平流最低,可见其动力结构较弱。黄淮气旋的非绝热加热数值最大,蒙古气旋的非绝热加热最小,根据气旋生成地和生成季节所携带的水汽差异,来自西南的黄淮气旋水汽充沛,凝结潜热作用高于西北的蒙古气旋。

表2 不同类型气旋温度平流、涡度平流和非绝热加热的平均值

Table 2 Average values of temperature advection, vorticity advection and diabatic heating for different types of cyclones

| | 温度平流/($10^{-4}\text{K}\cdot\text{s}^{-1}$) | 涡度平流/(10^{-8}s^{-2}) | 非绝热加热/($\text{K}\cdot(\text{6h})^{-1}$) |
|------|--|---------------------------------|---|
| 黄河气旋 | 5.7 | 21.7 | 9.7 |
| 蒙古气旋 | 5.9 | 14.9 | 7.0 |
| 江淮气旋 | 8.5 | 17.6 | 19.2 |

海洋下垫面对气旋发展的有利条件主要有两个方面,首先海洋下垫面较陆地摩擦力小,其次海洋洋面为气旋的低层提供水汽条件,低层扰动使水汽汇集到高层,水汽相变中的潜热释放为气旋发展提供有利条件^[37]。在气旋入海减弱过程中,往往是由于温度平流或涡度平流与地面气旋的配置不好导致的^[38],下垫面虽然对气旋有一定的影响,但并不是气旋入海发展的主要原因。

参考文献:

[1] 李长青,丁一汇.西北太平洋爆发性气旋的诊断分析[J].气象学报,1989,47(2):180-190.

Li Changqing, Ding Yihui. A diagnostic study of an explosively deepening oceanic cyclone over the Northwest Pacific Ocean[J]. Acta

的主要原因。

5 结论

通过对近11年引发黄渤海域大风的入海气旋10项气象因子统计分析,围绕气压梯度和气旋加深率讨论入海强度和变化成因,主要结论如下:

(1)在34次气旋过程中,有24次气旋入海是加强的,占总数的70.5%,有6次气旋入海过程强度不变,占总数的17.6%,有4次过程入海后减弱,占总数的11.7%,有5次爆发性气旋过程,占总数的14.7%。黄、渤海气旋大风主要发生在秋季,春冬季次之,夏季一次也没有出现过。入海发展的气旋多位于200 hPa高空急流出口左侧或者分流辐散区,入海减弱的气旋多位于高空急流出口右侧。高低空系统与地面气旋越近,地面气旋越强,气旋越容易发展。850 hPa系统与地面气旋的距离与气旋发展的相关性最高。

(2)影响黄海海域主要有3类气旋:自西北向东南移动的蒙古气旋(17.6%);自西向东移动的黄河气旋(49%);自西南向东北移动的江(黄)淮气旋(33.4%)。江(黄)淮气旋在秋季容易发展为爆发性气旋。黄河气旋和蒙古气旋入海后最大风区域通常出现在气旋的西北象限(或偏西象限),江(黄)淮气旋最大风区域出现在气旋的东南象限。冬季气旋平均气压值高于秋季和春季,春季气旋平均气压值最低。

(3)温度平流是气旋发展最重要的物理量因子。温度平流是3个因子中与气旋发展相关性最高的因子。温度平流和涡度平流对气旋发展比对气旋强度相关性更高。在爆发性气旋过程中,温度平流和涡度平流均高于其他气旋过程。非绝热加热是气旋发展相关性最小的因子,非绝热加热对气旋强度比对气旋发展的相关性更强。

(4)江(黄)淮气旋的温度平流最高,黄河气旋和蒙古气旋温度平流接近。黄河气旋的涡度平流最高,蒙古气旋的涡度平流最低。江(黄)淮气旋的非绝热加热数值最大,蒙古气旋的非绝热加热最小,江淮气旋水汽充沛,其凝结潜热作用高于蒙古气旋。由于海洋下垫面摩擦力小且水汽丰富,海洋下垫面的水汽通过低层扰动汇集到高层,高层的凝结潜热作用有利于江淮气旋的发展,作者将在今后的工作中对这种作用进行定量分析。

- Meteorologica Sinica, 1989, 47(2): 180–190.
- [2] 仪清菊, 丁一汇. 东亚和西太平洋爆发性温带气旋发生的气候学研究[J]. 大气科学, 1993, 17(3): 302–309.
Yi Qingju, Ding Yihui. Climatology of the explosive cyclogenesis over East Asia and the West Pacific[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 1993, 17(3): 302–309.
- [3] Sanders F. Explosive cyclogenesis in the West-Central North Atlantic Ocean 1981–1984[J]. Monthly Weather Review, 1986, 114(10): 1781–1794.
- [4] Schultz D M, Keyser D, Bosart L F. The effect of large-scale flow on low-level frontal structure and evolution in midlatitude cyclones[J]. Monthly Weather Review, 1998, 126(7): 1767–1791.
- [5] Pettersen S, Smebye S J. On the development of extratropical storms[J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1971, 97(414): 457–482.
- [6] 仪清菊, 丁一汇. 黄、渤海气旋爆发性发展的个例分析[J]. 应用气象学报, 1996, 7(4): 483–490.
Yi Qingju, Ding Yihui. An analysis of the explosive cyclone over Yellow Sea and Bohai Sea[J]. Journal of Applied Meteorology Science, 1996, 7(4): 483–490.
- [7] Sanders F, Gyakum J R. Synoptic dynamic dimatology of the “bomb”[J]. Monthly Weather Review, 1980, 108(10): 1589–1606.
- [8] 杜俊, 余志豪. 中国东部一次入海气旋的次级环流分析[J]. 海洋学报, 1991, 3(1): 43–50.
Du Jun, Yu Zhihao. Secondary circulation analysis of an incoming cyclone in eastern China[J]. Haiyang Xuebao, 1991, 3(1): 43–50.
- [9] 熊秋芬, 牛宁, 章丽娜. 陆地上爆发性温带气旋的暖锋后弯结构分析[J]. 气象学报, 2013, 71(2): 239–249.
Xiong Qiufen, Niu Ning, Zhang Lina. Analysis of the back-bent warm front structure associated with an explosive extratropical cyclone over land[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2013, 71(2): 239–249.
- [10] 赵琳娜, 赵思雄. 一次引发华北和北京沙尘暴天气的快速发展气旋的诊断研究[J]. 大气科学, 2004, 28(5): 722–735.
Zhao Linna, Zhao Sixiong. A diagnostic study of rapid developing cyclone in North China[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2004, 28(5): 722–735.
- [11] 张志刚, 赵琳娜, 矫梅燕. 一次引发强沙尘天气的快速发展蒙古气旋的诊断分析[J]. 气象, 2007, 33(5): 27–35.
Zhang Zhigang, Zhao Linna, Jiao Meiyun. Diagnostic analysis of a rapid developing cyclone in Mongolia causing severe sandstorm[J]. Meteorological Monthly, 2007, 33(5): 27–35.
- [12] 熊秋芬, 张玉婷, 姜晓飞, 等. 锢囚气旋钩状云区暴雪过程的水汽源地及输送分析[J]. 气象, 2018, 44(10): 1267–1274.
Xiong Qiufen, Zhang Yuting, Jiang Xiaofei et al. Analysis of moisture source and transport of snowstorm in hooked cloud area of an occluded cyclone[J]. Meteorological Monthly, 2018, 44(10): 1267–1274.
- [13] 熊秋芬, 张昕, 陶祖钰. 一次温带气旋涡度场演变特征及气旋发生发展机制分析[J]. 气象, 2016, 42(3): 294–304.
Xiong Qiufen, Zhang Xin, Tao Zuyu. An analysis of vorticity evolution and physics mechanism on an extratropical cyclone[J]. Meteorological Monthly, 2016, 42(3): 294–304.
- [14] 熊秋芬, 苟尚, 张昕. 一次温带气旋特殊移动路径及其结构和成因分析[J]. 高原气象, 2016, 35(4): 1060–1072.
Xiong Qiufen, Gou Shang, Zhang Xin. Structure and mechanism analysis of an extratropical cyclone on a cyclonic track[J]. Plateau Meteorology, 2016, 35(4): 1060–1072.
- [15] 郭达烽, 熊秋芬, 张昕. 一次北上江南气旋的结构特征与演变机理分析[J]. 气象, 2017, 43(4): 413–424.
Guo Dafeng, Xiong Qiufen, Zhang Xin. Structure and mechanism analysis of one Jiangnan cyclone with Northern Track[J]. Meteorological Monthly, 2017, 43(4): 413–424.
- [16] 王慧, 张博, 吕心艳, 等. 2018年一次温带气旋入海爆发性增强时期的集合预报对比分析[J]. 气候与环境研究, 2019, 24(6): 741–754.
Wang Hui, Zhang Bo, Lü Xinyan, et al. Comparative investigation of ensemble forecast of explosive cyclone entering Southern Yellow Sea in Spring 2018[J]. Climatic and Environmental Research, 2019, 24(6): 741–754.
- [17] 黄立文, 秦曾灏, 吴秀恒, 等. 海洋温带气旋爆发性发展数值试验[J]. 气象学报, 1999, 57(4): 410–427.
Huang Liwen, Qin Zenghao, Wu Xiuheng, et al. Numerical simulation and experiment study on explosive marine cyclones[J]. Acta Meteorologica Sinica, 1999, 57(4): 410–427.
- [18] 赵兵科, 刘屹岷, 梁萍. 夏季梅雨期一次强江淮气旋位涡反演分析[J]. 高原气象, 2008, 27(S1): 158–169.
Zhao Bingke, Liu Yimin, Liang Ping. A PV inversion analysis of strong cyclone over the Yangtze and Huaihe River Valleys during the Meiyu period of summer[J]. Plateau Meteorology, 2008, 27(S1): 158–169.
- [19] 赵兵科, 吴国雄, 姚秀萍. 2003年夏季梅雨期一次强气旋发展的位涡诊断分析[J]. 大气科学, 2008, 32(6): 1241–1255.
Zhao Bingke, Wu Guoxiong, Yao Xiuping. A diagnostic analysis of potential vorticity associated with development of a strong cyclone during the Meiyu period of 2003[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2008, 32(6): 1241–1255.
- [20] 查贲, 沈杭锋, 郭文政, 等. 一次爆发性气旋及其诱发的大风天气分析[J]. 高原气象, 2014, 33(6): 1697–1704.
Zha Ben, Shen Hangfeng, Guo Wenzheng, et al. Analysis of gale process caused by an explosive cyclone[J]. Plateau Meteorology, 2014, 33(6): 1697–1704.
- [21] 尹尽勇, 曹越男, 赵伟, 等. 一次黄渤海入海气旋强烈发展的诊断分析[J]. 气象, 2011, 37(12): 1526–1533.
Yin Jinyong, Cao Yuenan, Zhao Wei, et al. A diagnostic study of an intense developing extratropical cyclone over the Bohai and Yellow Sea[J]. Meteorological Monthly, 2011, 37(12): 1526–1533.

- [22] 黄彬,陈涛,康志明,等. 诱发渤海风暴潮的黄河气旋动力学诊断和机制分析[J]. 高原气象, 2011, 30(4): 901–912.
Huang Bin, Chen Tao, Kang Zhiming, et al. Dynamic diagnosis and mechanism analysis of Yellow River cyclone induced Bohai storm tide[J]. Plateau Meteorology, 2011, 30(4): 901–912.
- [23] 黄彬,钱传海,聂高臻,等. 干侵入在黄河气旋爆发性发展中的作用[J]. 气象, 2011, 37(12): 1534–1543.
Huang Bin, Qian Chuanhai, Nie Gaozhen, et al. Dry intrusion into the march 2007 strong storm surge over Bohai Sea[J]. Meteorological Monthly, 2011, 37(12): 1534–1543.
- [24] 苗春生,宋萍,王坚红,等. 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, 2015, 41(9): 1068–1078.
Miao Chunsheng, Song Ping, Wang Jianhong, et al. Comparative study of impact factors of the Yellow River cyclones over the Bohai Sea in spring and summer[J]. Meteorological Monthly, 2015, 41(9): 1068–1078.
- [25] 吕筱英,孙淑清. 气旋爆发性发展过程的动力特征及能量学研究[J]. 大气科学, 1996, 20(1): 90–100.
Lü Xiaoying, Sun Shuqing. A study on the dynamic features and energy conversion of the development of explosive cyclones[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 1996, 20(1): 90–100.
- [26] 盛春岩,杨晓霞. “09.4.15”渤海和山东强风过程的动力学诊断分析[J]. 气象, 2012, 38(3): 266–273.
Sheng Chunyan, Yang Xiaoxia. Dynamic diagnostic analysis of the 15 April 2009 Gale wind over the Bohai Sea and Shandong Province[J]. Meteorological Monthly, 2012, 38(3): 266–273.
- [27] Fu Gang, Sun Yawen, Sun Jilin, et al. A 38-year climatology of explosive cyclones over the northern Hemisphere[J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2020, 37(2): 143–159.
- [28] 盛春岩,李建华,范苏丹. 地形及下垫面对渤海大风影响的数值研究[J]. 气象, 2014, 40(11): 1338–1344.
Sheng Chunyan, Li Jianhua, Fan Sudan. Numerical study of terrain and underlying surface effect on Bohai Gale[J]. Meteorological Monthly, 2014, 40(11): 1338–1344.
- [29] Petterssen S, Dunn G E, Means L L. Report of an experiment in forecasting of cyclone development[J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 1955, 12(1): 58–67.
- [30] Yoshida A, Asuma Y. Structures and environment of explosively developing extratropical cyclones in the northwestern Pacific region[J]. Monthly Weather Review, 2004, 132(5): 1121–1142.
- [31] 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: 320–323.
Zhu Qiangen, Lin Jinrui, Shou Shaowen, et al. Synoptic Principles and Methods[M]. 4th ed. Beijing: China Meteorological Press, 2007: 320–323.
- [32] 姚秀萍,闫丽朱,张硕. 大气非绝热加热作用的研究进展与展望[J]. 气象, 2019, 45(1): 1–16.
Yao Xiuping, Yan Lizhu, Zhang Shuo. Research progresses and prospects of atmospheric diabatic heating[J]. Meteorological Monthly, 2019, 45(1): 1–16.
- [33] 周小刚,王秀明,陶祖钰. 准地转理论基本问题回顾与讨论[J]. 气象, 2013, 39(4): 401–409.
Zhou Xiaogang, Wang Xiuming, Tao Zuyu. Review and discussion of some basic problems of the quasi-geostrophic theory[J]. Meteorological Monthly, 2013, 39(4): 401–409.
- [34] 朱男男,刘彬贤. 一次引发黄渤海大风的爆发性气旋过程诊断分析[J]. 气象与环境学报, 2015, 31(6): 59–67.
Zhu Nannan, Liu Binxian. Diagnostic analysis of outbreak cyclone induced strong wind over Yellow and Bohai Seas[J]. Journal of Meteorology and Environment, 2015, 31(6): 59–67.
- [35] Emanuel K A, Fantini M, Thorpe A J. Baroclinic instability in an environment of small stability to slantwise moist convection. Part I: two-dimensional models[J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 1987, 44(12): 1559–1573.
- [36] Raymond D J. Nonlinear balance and potential-vorticity thinking at large Rossby number[J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1992, 118(507): 987–1015.
- [37] 秦昕,魏立新. 中国近海温带气旋的时空变化特征[J]. 海洋学报, 2015, 37(1): 43–52.
Qin Ting, Wei Lixin. The statistic and variance of cyclones entering coastal waters of China in 1979–2012[J]. Haiyang Xuebao, 2015, 37(1): 43–52.
- [38] 朱男男,刘彬贤,孙密娜,等. 引发渤海风暴潮一次江淮气旋北上过程诊断分析[J]. 气象与环境学报, 2016, 32(5): 10–17.
Zhu Nannan, Liu Binxian, Sun Mina, et al. Diagnostic analysis of a northward cyclone over the Yangtze-Huaihe Rivers causing storm surge in the Bohai Sea[J]. Journal of Meteorology and Environment, 2016, 32(5): 10–17.

Statistic characteristics and strengthening analysis of cyclones over the Yellow Sea and the Bohai Sea in recent 10 years

Zhu Nannan^{1,3}, Xiong Qiufen², Hu Tiantian¹, Ma Jianming¹, Wang Ya'nan¹

(1. Tianjin Central Observatory for Oceanic Meteorology, Tianjin 300074, China; 2. China Meteorological Administration Training Center, Beijing 100081, China; 3. Tianjin Key Laboratory for Oceanic Meteorology, Tianjin 300074, China)

Abstract: The hourly surface AWS data, conventional surface and radiosonde observation data and NCEP-FNL reanalysis data over the period of 2008–2018 were used for analyzing the cyclonic gale processes in the Bohai Sea and the Yellow Sea. The cyclone deepening rate and the pressure gradient were also discussed to analyze the relationship between the meteorological factors and the strength of the cyclone. Based on the Petterssen equation of the surface cyclone development, the effects of temperature advection, vorticity advection and diabatic heating in cyclone development were discussed. The results show: (1) 70.5% of the cyclones were strengthened after entering the sea, 14.7% of them became explosive cyclones, 17.6% of them were invariant, and 11.7% of them weakened. The extratropical cyclones which caused strong winds in the Yellow Sea and the Bohai Sea mainly occurred in autumn, secondly in spring and winter, and hardly appeared in summer. The enter sea cyclones were developed on the left-side of the exit of upper-level jet stream or the diverging region, and weakened on the right side of the exit of upper-level jet stream. (2) There are three kinds of cyclones which have effects on the Yellow Sea and the Bohai Sea: the Mongolian cyclones (17.6%) which moved from the northwest to the southeast; the Yellow River cyclones (49%) moved from the west to the east, the Changjiang-Huaihe cyclones (33.4%) moved from the southwest to the northeast which tend to develop into explosive cyclones in autumn. The maximum wind speed region often appears in the northwest (or the west) quadrant of the cyclone in the autumn and winter season, and the maximum wind speed region appears in the southeast quadrant of the cyclone in the spring. (3) The correlation coefficient of the temperature advection and cyclone deepening rate is higher than that of vorticity advection and diabatic heating. The correlation coefficient temperature advection and cyclone deepening rate, vorticity advection and cyclone deepening rate are greater than the correlation coefficient of the barometric gradient and cyclone deepening rate. The temperature advection and vorticity advection in the four analyzed explosive cyclones events were stronger than in other cyclones events. The correlation of diabatic heating and the barometric gradient is stronger than it with the cyclone variation rate. (4) The temperature advection and diabatic heating have important effects on the Huang-huai and Jianguai cyclone. The effects from the vorticity advection on the Yellow River cyclone are more important, and the effects from the vorticity advection and diabatic heating on the Mongolian cyclone are the least.

Key words: cyclone over the Yellow Sea and the Bohai Sea; statistical analysis; explosive cyclone; temperature advection; vorticity advection; diabatic heating