

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.

干侵入在黄河气旋爆发性发展中的作用^{* 1}

黄 彬 钱传海 聂高臻 向纯怡

国家气象中心, 北京 100081

提 要: 利用数字化的 6.7 μm 卫星水汽图像资料、NCEP/NCAR 逐 6 小时 $1^\circ \times 1^\circ$ 再分析等资料和干侵入、位涡理论, 对 2007 年 3 月 3—5 日引发渤海强风暴潮的黄河气旋发展过程进行了天气动力学分析, 揭示干侵入在爆发性黄河气旋中的特征和作用。结果表明: 本次渤海强风暴潮是发生在泰米尔半岛附近不稳定小槽东移发展, 东亚大槽重建的过程中, 是对流层高层干侵入下沉引起黄河气旋爆发性发展产生强东北大风所致。干侵入具有高位势涡度特征, 高位涡区和水汽图像上的暗区形态及强度变化特征对气旋生命史不同阶段有预报指示意义。干冷和暖湿气流沿着等熵面 Ω 型皱折带南北流动, 使得等熵面陡峭程度加大, 大气的斜压性增强; 尽管高层干侵入在下沉过程中会产生增温效应, 但在下沉运动和强冷平流效应的共同作用下, 地面气旋的上空出现水平方向温度比临近地区低的现象, 大气静力稳定度减小, 绝对涡度 ($\zeta_p + f$) 增大, 促使中低层气旋性涡度发展, 垂直上升运动迅速加强, 导致地面气旋强烈发展。

关键词: 黄河气旋, 爆发性发展, 水汽图像, 位涡, 干侵入

Dry Intrusion into the March 2007 Strong Storm Surge over Bohai Sea

HUANG Bin QIAN Chuanhai NIE Gaozhen XIANG Chunyi

National Meteorological Centre, Beijing 100081

Abstract: Based on the dry intrusion theory and potential vorticity theorem, by using the water vapor image and NCEP/NCAR $1^\circ \times 1^\circ$ reanalysis data, the synoptic and dynamic characteristics of a strong storm surge over the Bohai Sea from 3 to 5 March 2007 are analyzed. The feature and influence of dry intrusion on the Yellow River cyclone are also revealed. The result shows that the storm surge occurred during the adjustment of Eurasia mid and high latitude circulation, the east moving and development of unstable low rough and the rebuilding of East-Asia major trough. Northerly gale induced by strongly developed the Yellow River cyclone forced the surge to sharply bloom. Dry intrusion has features of high PV value. The shape and strength changes of high PV area, with dark zone on water vapor image, have a meaningful prediction to different stages of cyclones. When dry-cold air currents meet with warmer wet air flow along a inverted " Ω " lapping belt from north to south, the isentropic surface becomes steeper and the stability of atmosphere decreases. Although the downward progress of dry intrusion from high level will lead to warming effect, the cooling effect from the strong cold advection can give birth to decreasing of atmospheric stability. Therefore the high level vortex, corresponding to surface cyclone, has lower temperature than the adjacent areas. As a result, the mid-low level cyclonic vorticity is increased, the upward vertical movement is reinforced, and then the surface cyclone is strongly developed.

Key words: Yellow River cyclone, explosive development, water vapor image, potential vorticity, dry intrusion

* 黄渤海高影响天气预报中的关键技术研究(GYHY201106006)项目资助

2011 年 5 月 13 日收稿; 2011 年 7 月 1 日收修定稿

第一作者: 黄彬, 主要从事台风与海洋气象预报工作. Email: hbj199928@163.com

引 言

温带气旋是我国主要灾害性天气系统,具有生成突然、发展迅速、影响范围广之特点,其地面中心气压在短时内急剧下降,气旋附近风速剧增,并引发风暴潮、暴风雪和沙尘暴等剧烈天气。而风暴潮亦称风暴海啸,是局部海域潮位非周期异常升高的一种较为严重的自然灾害。通常是由温带气旋、台风和寒潮所引起的,我国渤海湾和莱州湾是受风暴潮影响最严重的地区之一。王喜年^[1]分析指出,诱发渤海湾风暴潮的天气型有强孤立温带气旋类、冷锋类和冷锋配合低压类三种,其气象因素主要是大风。胡欣等^[2]分析了风暴潮影响天气系统和风场结构,发现偏东路径强冷空气与暖湿气流共同作用,形成持久强东北大风是渤海风暴潮主要强迫动力。Patrick 等^[3]把位涡理论、数值预报产品和卫星水汽图像紧密结合,利用位涡判断中纬度温带天气系统发展。这些天气系统在发展和演变过程中还与干侵入(dry intrusion)过程密切相关。许多观测事实表明干侵入在红外云图和水汽图像上表现为少云区或暗区,以干缝(dry slot)形式存在^[4],为预报员提供了一种有效的应用卫星和数值预报资料的思路。

近年来,干侵入与温带气旋发生发展的研究已取得可喜的成果。Spencer 等^[5]对干侵入在气旋发展过程中的作用进行过介绍。Browning 等^[6-7]和 McCallum 等^[8]指出,干侵入是指对流层顶附近具有高位势涡度和低湿球位温特征的气流侵入到低层之现象。从水汽图像识别干侵入有助于预报员了解中尺度天气的发生,这在气旋快速生成而引发对流活动极其有价值。Young 等^[9-10]在研究急剧发展的气旋时,发现源于对流层顶附近的干冷空气的“楔入”对气旋强烈发展起着相当重要的作用。Rogers 等^[11]对大西洋气旋分析表明,气旋初生是浅薄的斜压系统,温度平流对气旋发展有重要贡献,当高空槽到达气旋上空时,气旋得到迅速发展。Hoskins^[12]对位涡理论进行深入研究后指出,对流层上部或平流层的位涡扰动可以下传影响到对流层下部及地面气旋发展。Davis 等^[13]对气旋生成的位涡反演诊断分析得出高层位涡异常是平流的结果,低层位涡异常是非绝热效应的结果,高低层位涡的叠置对气旋发生和发展起重要作用。在国内,吕梅等^[14]研究江

淮气旋的发展提出,中低层暖输送带和中上层冷输送带在气旋发展中至关重要;吕筱英等^[15]发现高空大值位涡的下伸是气旋爆发性发展的一个重要条件。气旋是向着高空的大值位涡区移动,当上下位涡区贯通再爆发性发展。

近些年来,干侵入和位涡理论用于温带气旋发生发展虽取得一些有益结果,但是研究还不够系统和深入,尤其在温带气旋引发沿海风暴潮的天气过程中分析较少。其中干侵入和水汽图像在海上大风及风暴潮过程中的演变特征和应用的研究则更少,对该问题的深入分析研究有助于进一步认识海上大风及其风暴潮的发生机理,为风暴潮的预报提供预报思路。本文利用数字化的 $6.7 \mu\text{m}$ 卫星水汽图像、NCEP/NCAR $1^\circ \times 1^\circ$ 的逐 6 小时再分析资料和常规气象观测资料,分析 2007 年 3 月 3—5 日渤海强风暴潮过程中爆发性发展的黄河气旋干侵入的特征,研究黄河气旋的演变特征和发展过程机制及干侵入在卫星水汽图像上的表现特征,初步探讨温带气旋发展中干侵入、位涡的作用,为温带气旋和风暴潮预报提供参考依据和拓宽思路。

1 风暴潮天气过程概述

1.1 风暴潮天气实况

受爆发性发展的黄河气旋影响,2007 年 3 月 3—5 日,渤海湾、莱州湾沿岸的威海、烟台、潍坊、滨州、东营和青岛等 6 市 13 个县(市、区)遭遇强风暴潮和暴风雪袭击。从 3 日白天开始,渤海沿岸的风力逐渐增大到 8~9 级,阵风 11 级,风向由东北风逐渐转为西北风。山东半岛大部地区风力在 8 级以上,出现在 4 日夜间,其中烟台极大风速为西北风 $37.1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,而威海极大风速是东北风 $38.6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,均达到 13 级。同时,山东和辽宁还出现了大范围强降水,大部地区降大到暴雨(雪),部分地区有小到中雨(雪),山东日照市降水量最大,达 64.1 mm (图 1)。山东这次过程降水量是 1951 年以来历史同期降水强度和范围最大一次。持续的强东北风促使外海的海水涌入渤海,之后转为西北风正好冲向渤海南岸的山东省,强而持久的偏北大风将海水涌向岸边,导致山东北部潮位上涨,产生风暴增水;同时大范围强降水对海面的增高也起了促进作用。3 月 4 日又是农历正月十五,刚好是天文大潮期,与气

象条件造成的风暴增水相叠加,增强了风暴潮。此次风暴潮来势凶猛、强度大、持续时间长,整个环渤海地区都出现较大的风暴增水,最大风暴增水为 100~200 cm,大部地区达到或超过警戒潮位,其中潍坊羊角沟最高潮位达 570 cm,超过警戒水位 70 cm,烟台莱州湾最高达 320 cm,超过警戒水位 20 cm。此次风暴潮是 1949 年以来仅次于 1969 年的强风暴潮,烟台和威海两市北部沿海发生海水倒灌,

部分码头坍塌,海水冲毁防浪堤坝,海水养殖受到严重损失,受灾人口 64.15 万人,损坏船只 2100 余艘,600 多间房屋倒塌,农作物受灾面积约 $35.71 \times 10^3 \text{ hm}^2$,直接经济损失 40.1 亿元,达到特大型气象灾害标准。

1.2 黄河气旋的发生和发展

渤海这次强风暴潮是发生在泰米尔半岛附近不稳定小槽东南移发展,东亚大槽重建的过程中。2 月末,由于乌拉尔山高压脊经向发展,导致泰米尔半岛附近小槽向南加深,同时,孟加拉湾的南支小槽也逐日东移;3 日 12 时(世界时,下同)当两槽分别移至我国黄河中游及西南地区东部时同位相叠置,建立了南北经向度很大的东亚大槽(图 2a)。南支槽引导北支槽中干冷空气(被称之为干侵入^[6],源于乌拉尔山高压脊前高层亚洲北部地区)南下,槽后有强冷平流输送,槽前西南风速明显加大,暖平流增强,在暖平流最强处的苏北诱生一低压中心,并出现暖锋锋生,当北槽地面冷锋同暖锋相接,黄河气旋生成。

4 日 00 时黄河气旋开始发展,此时在 500 hPa 图上(图略),不稳定小槽已移到黄河中游,在槽后西北气流中的贝加尔湖附近还有一近东北—西南向的横槽,两槽形成阶梯槽,有利于贝加尔湖槽后干冷空气进而南下,侵入气旋中。已与黄河中游槽后偏北气流相连的贝加尔湖槽后的西北风风速达 $20 \sim 30 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,这支干冷气流也是来源于亚洲北部地区高层,其下沉到气旋内的对流层中下层,对温带气旋发生发展,爆发性气旋快速发展等起着重要作用^[16]。

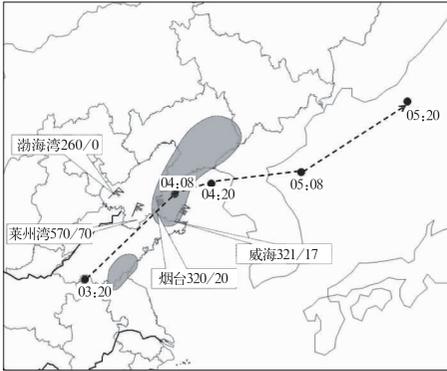


图 1 2007 年 3 月 3 日 00 时至 5 日 12 时(世界时)山东省渤海沿岸最高潮位和极大风向、风速

图中数字为最高潮位/超过警戒水位高度,单位:cm,虚线为气旋路径,阴影区为累积降水量超过 50 mm 区域

Fig.1 The highest tide level and the direction with maximum wind along the Bohai Sea coast in Shandong during 00:00 UTC 3 March to 12:00 UTC 5 March, 2007 numbers are the highest tide level/height of exceeding the warning water level, unit: cm; dashed line is the track of the cyclone, the shaded areas denote areas with accumulated precipitation exceeding 50 mm

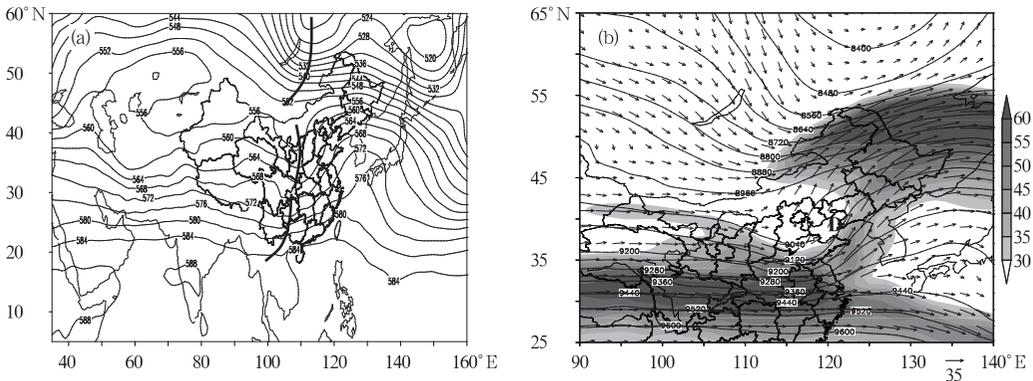


图 2 2007 年 3 月 3 日 12 时 500 hPa 高度场(a)(单位:dagpm)和 4 日 00 时 300 hPa 流线、高度场(b)(单位:gpm) 阴影区为风速 $\geq 30 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, D 为气旋中心位置

Fig.2 The 500 hPa geopotential height filed (a) at 12:00 UTC 3 March (unit: dagpm), and the 300 hPa streamline and height field (b) at 00:00 UTC, 4 March 2007 (unit: gpm) speeds exceeding $30 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ are shaded and D is the center of cyclone

对应黄河气旋在华北中低层 700 和 850 hPa 上为一低涡,低涡前部伴随着一支低空急流,低涡附近南北风速均达到了 $12 \sim 20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (图略),并且温度槽落后于高度槽,等温线与等高线正交近似 90° ,反映槽前后冷暖平流强盛,利于气旋发展。此时,300 hPa 上南北两支急流已打通,地面气旋中心正好位于急流中心的左前方(图 2b),流场散开,辐散较强。这些天气学条件均有利于黄河气旋入海后强烈发展。4 日 00 时至 5 日 00 时 24 小时内其中心气压从 1004 hPa 下降至 986 hPa,达 18 hPa,达吉龙数达 1.01;黄河气旋爆发性发展导致气旋西北侧 5 个纬距内气压差值高达 35 hPa,强气压梯度力使黄渤海出现持久的东北向岸大风,酿成严重的风暴潮灾害。

2 黄河气旋发展中的干侵入特征

2.1 水汽图像上的干侵入特征

水汽图像上亮的灰度区是低层水汽向上伸展较高的地方,暗区则是对流层上部的干冷空气向下伸展最低的地方。上述北支槽中的干侵入气流的下沉控制区是干区,在水汽图像上干区与湿区之特征有着明显差异,白色到亮灰是云区,中等灰度为相对湿区,暗灰色到近黑色是干区(简称暗区);并且图像与位涡场结合,是解释水汽图像最合适的方法^[3]。

在黄河气旋发生发展阶段,伴随干侵入气流的大值位涡自高层向低层伸展。在黄河气旋生成前 24 小时,等位涡线开始呈波状,并对应高空槽出现向下伸展的大位涡舌,0.5 PVU 已下伸至 600 hPa 层。气旋生成时,大位涡舌即已向下传递到江淮和黄淮低层,原在 450 hPa 上大于 1.5 PVU 的中心增强到大于 2.5 PVU 并移至黄河下游上空 850 hPa 层面上。气旋爆发性发展时,在气旋中心上空 1.5 PVU 呈现柱状结构,低层 PVU 中心继续加强大于 3 PVU,仍分布在 850 hPa 层面上,而在气旋中心北侧出现一个向下伸展的大位涡舌,1 PVU 等值线前边界抵达 800 hPa,于是在气旋中心及北侧均出现下传的大位涡舌区(图略)。下面将把与干侵入密切相关的位涡场和水汽图像联系在一起判读,以了解黄河气旋发展过程中干侵入在水汽图像上的一些表现特征及作用。由于本例气旋发生在已经存在的锋面上,则中低层温压场变化更为清楚。分析表明 $\theta_{se} = 315 \text{ K}$ 等熵面位涡气流能较好地显示出黄河气旋

发展特征。从黄河气旋发展过程中的几个典型时段水汽图像和 315 K 等熵面上的位涡、风场合成图(图 3)上可看出。3 日 18 时(气旋生成时段),伴随黄河上游以北地区的干冷气流,位涡等值线密集区是呈西北—东南向前伸的舌区,与水汽图像上的暗区相对应(图 3a),暗区随位涡舌区的东移而相随。到 4 日 06 时(发展时段),西北气流、位涡舌区和暗区一起向东南移至黄河下游等地上空,位涡舌区中出现大值中心,中心值大于 5 PVU,该中心距黄海北部海域的气旋中心约 2 个经距,并且位涡舌区已开始向北翘起,呈现出气旋性弯曲的结构(图 3b),在水汽图像上干、湿区互相卷入形成基本雏形。4 日 18 时(发展时段),位涡舌区与暗区在向东偏南方向的移动中,范围明显扩大,强度加强,位涡舌中心与气旋中心逐渐靠近,表明具有大值位涡的干侵入气流已侵袭到气旋中心附近,黄河气旋则迅速发展。气旋干、湿空气结合的核,气旋的“6、9”型结构已经形成(图 3c)。在水汽图像上向上伸展到高层较亮区域为“水汽山脉”,向下伸展到低层干冷空气的暗区是“谷地”,“6、9”型结构是指在水汽图像上“6”字型湿层等高线与“9”字型“谷地”互相缠绕组成的结构,类似于热带气旋高层的外流螺旋云带结构,温带气旋的这种结构正是气旋中心附近干侵入和湿气流关系的理想概念模型在水汽图像上的反映^[6]。到 5 日 00 时,气旋已发展到成熟阶段,位涡舌随着暗区向气旋中心卷入(图 3d),气旋锢囚。综上所述,干侵入气流、水汽图像的暗区与等熵面上高位涡等值线密集区有很好对应关系,干侵入暗区和位涡等值线前伸舌区同步从气旋西部卷入到气旋中心上空,形成干、湿缠绕混合区。对气旋发展起着重要的作用。

2.2 等熵面上的干侵入气流和位涡特征

等熵分析是假定短期内的天气过程是绝热和无摩擦的,这时空气微团将始终在等熵面上运动,故在两个等熵面之间的空气柱尽管在运动过程中有所收缩,但始终被禁锢在两个等熵面之间^[17]。我们内插出 315~350 K 间隔 5 K 共 8 层等熵面上的位涡,从位涡变化(图略)可知,随着高度升高,干侵入(位涡)偏东且增强。图 4 是能较好地反映黄河气旋发展特征的 $\theta_{se} = 315 \text{ K}$ 等熵面上的气流、位势高度和位涡叠置图。从 3 日 18 时等熵面上的高度场分布(图 4a)可看出,等熵面在黄河中上游地区形成了一条“ Ω ”型皱折带,来自高纬度的干冷气流在“ Ω ”型西部沿着陡峭等熵面下滑并呈扇状散开,一部分进入

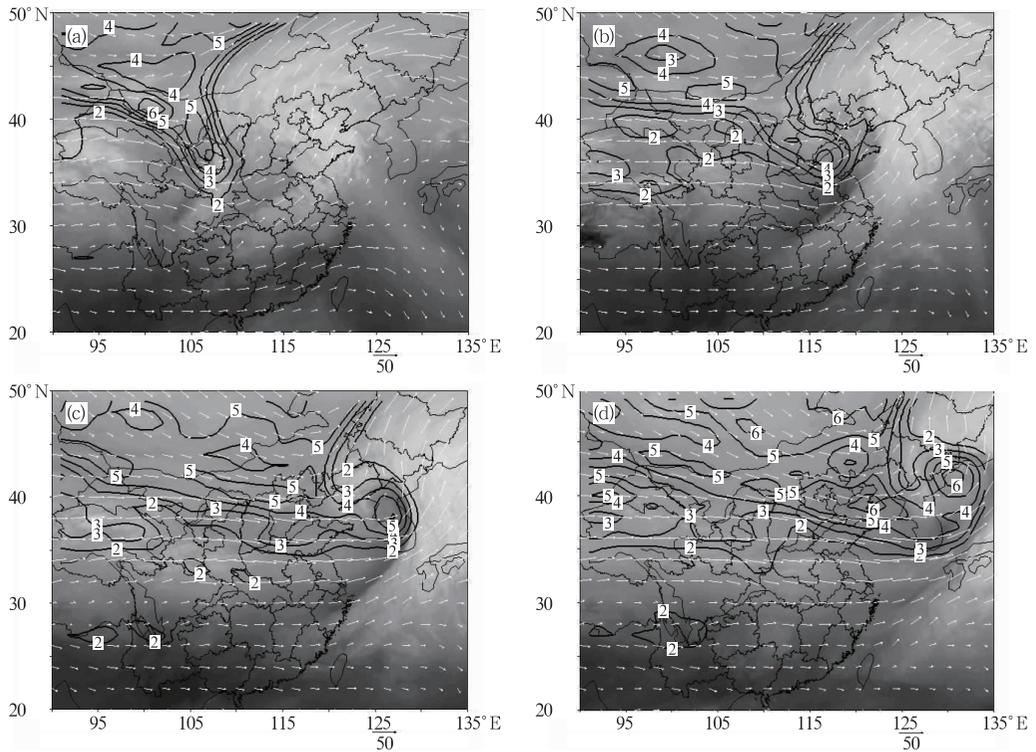


图 3 GOES-9 水汽图像与 $\theta_{se} = 315$ K 等熵面位涡、风场合成图

(a)2007 年 3 月 3 日 18 时, (b)4 日 06 时, (c)4 日 18 时, (d)5 日 00 时

Fig. 3 Potential vorticity and wind field at $\theta_{se} = 315$ K isentropic surface combined with GOES-9 water vapor image at (a) 18:00 UTC 3 March,

(b) 06:00 UTC 4 March, (c) 18:00 UTC 4 March and (d) 00:00 UTC 5 March 2007

低压环流之中,在水汽图像上暖输送带产生的云头低云间形成相对的晴空区,从而导致“干缝”现象,这就构成在暖输送带冷侧形似斧状的暗区。位涡在 $35^{\circ}\sim 42^{\circ}\text{N}$ 、 $105^{\circ}\sim 110^{\circ}\text{E}$ 的范围内形成一个前伸的舌区,但强度较弱;而地面气旋的黄河下游及沿海一带为等熵面上的西南气流的辐散区,气旋在此区及位涡舌区的右前方发展。西南气流是从位涡舌区西侧沿着等位势高度线被推进到位涡区前部,然后流向位涡舌东侧,一部分沿等熵面向北爬升,到达辽宁东部、内蒙古东南部一带上空,即已升至 6800 gpm 左右,亦呈扇状散开状,导致此处等熵面变得更为陡立。4 日 06 时,位涡舌区不断加强并东移。气旋仍在位涡舌区的右前方发展(图 4b),其中心位于 38°N 、 123°E 附近,干冷西北气流已下滑到黄海西北部,并与流入渤海、黄海北部爬升的西南气流呈缠绕状,造成强的水平变形区,干侵入气流沿着斧形干区头部向极一侧的气流分量下沉进入气旋中心的上空,气旋开始在黄海北部海域强烈发展。等熵面上的等高线密集带分布在黄海、渤海区域,位涡舌区沿

着西北气流下滑,皱折区向东北方向突起,出现了“S”型弯曲状,这是气旋发展的理想概念模型^[6]。4 日 18 时,气旋继续处于发展期,地面气旋已移到朝鲜半岛,中心位于 39°N 、 128°E ,等高线密集带已移到朝鲜半岛(图 4c),随着西北气流下滑到渤海、黄海北部海域,与之相伴的 2~4 PVU 位涡舌区覆盖华北东部、渤海、黄海北部和朝鲜半岛等地,强度显著加强,同时位涡舌区伸入气旋中心区域斜压区,相应的黄河气旋中心气压 9 h 内下降 11 hPa,出现爆发性发展。正如有关研究^[18]指出:当高层 PV 大值区凌驾于低层斜压区时,高低空出现耦合效应,气旋出现快速生成和发展。也说明具有高位势涡度和低湿球位温特征的干侵入对黄河气旋发展起了重要作用。而后,位涡区向东北方向翘起,并向着等高线脊区皱折带卷入,西南气流沿着皱折内陷区东部先下降、后爬升,皱折区西北部的西北气流则继续下沉。等高线密集带高、低值出现明显的气旋式缠绕特征。到了 5 日 00 时,等高线密集带、位涡高、低值区的气旋式缠绕特征更加明显(图 4d)。位涡沿着西北气

流进一步下滑,其大值区下滑到 35°N 附近,位涡下滑舌区前端已卷入气旋中心出现干螺旋带,干湿汇合的核区即干湿缠绕形成了螺旋(“6、9”)型结构,干侵入暗区围绕气旋中心旋转一周以上。表明气旋已发展到成熟阶段。总之,随着气旋的东移发展,在西北气流的引导下,干侵入和高位涡扰动区同步向东偏南方向运动。干侵入表现为高位涡的下传和侵入。另外,在 35°N 以北低涡的西侧,高位涡沿着等

熵面从高层向低层下滑,根据下滑倾斜涡度发展理论^[19],当具有高位涡的干侵入气流沿着等熵面从高层向低层下滑时,将使得中低层的垂直涡度发展,低涡发展;而在低涡以东,暖湿气流沿着等熵面爬升,根据上滑倾斜涡度发展的理论^[20],低涡所在的中低层垂直涡度也发展,低涡加强及对流层高层高位涡下传使低层大气斜压性增大,对流稳定度减小,导致气旋性涡度发展。

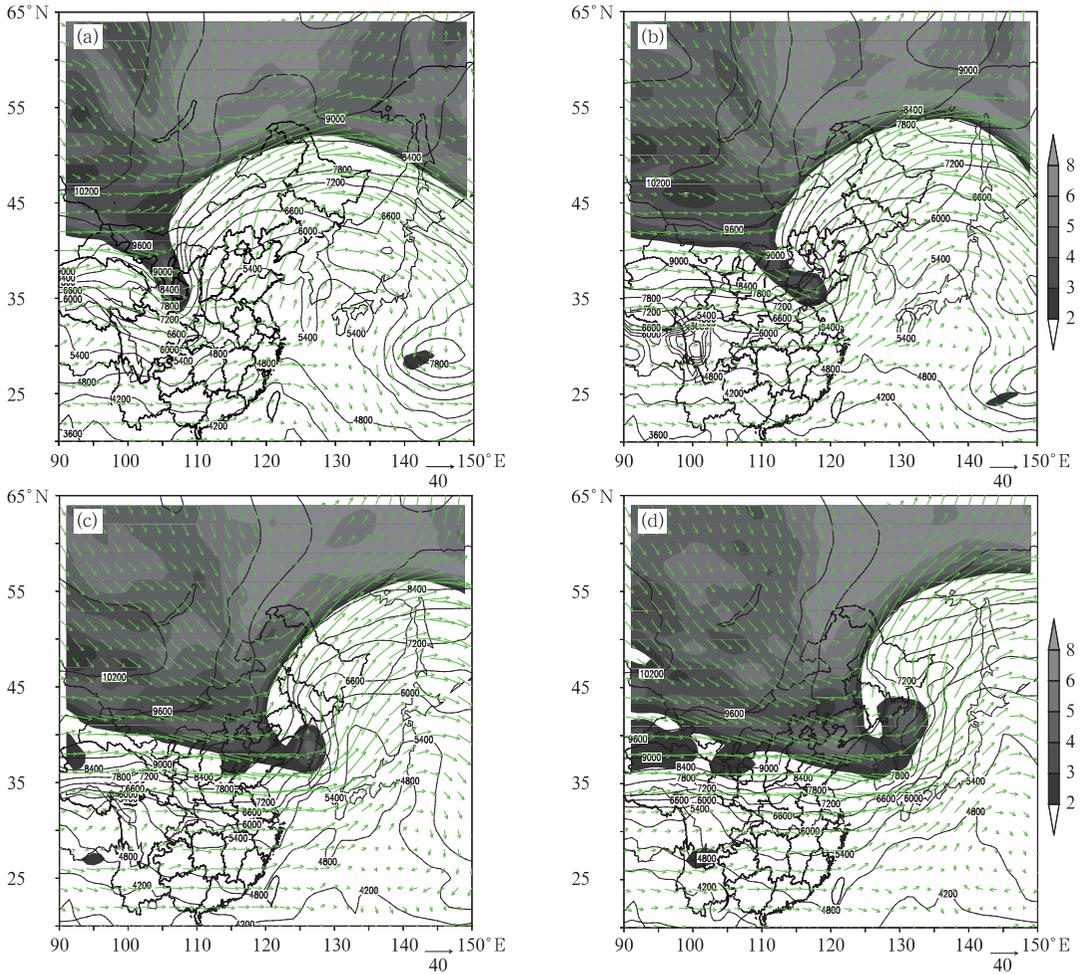


图 4 $\theta_{se} = 315\text{ K}$ 等熵面位涡(阴影区)、位势高度场(实线,单位:gpm),风场合成图

(a)2007 年 3 月 3 日 18 时, (b)4 日 06 时, (c)4 日 18 时, (d)5 日 00 时

Fig. 4 Potential vorticity (shaded), geopotential height (solid lines, unit: gpm) and wind field at

$\theta_{se} = 315\text{ K}$ isentropic surface at (a) 18:00 UTC 3 March, (b) 06:00 UTC 4 March,

(c) 18:00 UTC 4 March and (d) 00:00 UTC 5 March, 2007

2.3 干侵入的湿位涡和假相当位温特征

这次黄河气旋强烈发展不仅诱生风暴潮,还引发了强降水,因此,有必要分析其湿物理过程。湿位涡物理量综合涵盖大气动力、热力以及水汽的作

用^[21],所以对湿位涡进行诊断,试图寻求热力、动力和水汽条件与气旋发展的关系。

在 P 坐标下,并假定垂直速度的水平变化比水平速度的垂直切变小得多,湿位涡 MPV 的表达式为:

$$MPV = -g(\zeta_p + f) \frac{\partial \theta_{se}}{\partial p} + g \left(\frac{\partial v}{\partial p} \frac{\partial \theta_{se}}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial p} \frac{\partial \theta_{se}}{\partial y} \right)$$

其分量形式是:

$$MPV_1 = -g(\zeta_p + f) \frac{\partial \theta_{se}}{\partial p}$$

$$MPV_2 = g \left(\frac{\partial v}{\partial p} \frac{\partial \theta_{se}}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial p} \frac{\partial \theta_{se}}{\partial y} \right)$$

MPV_1 、 MPV_2 分别是湿位涡的湿正压项和湿斜压项。当等熵面与等压面近似平行时, $MPV_1 \gg MPV_2$, 故以下只对湿正压项进行分析。

4 日 06 时, 中心位于黄海西北部的黄河气旋处于发展盛期, 从穿过气旋中心位温、温度平流和水平风场纬向垂直剖面图(图 5)上可看出, 在气旋西侧等位温线上凸, 东侧下凹, 在气旋中心附近形成“漏斗状”, 表明大气层结位势不稳定。在对流层各层上均存在干侵入下沉气流, 与整层冷区相对应, 较强冷平流出现在 700 hPa 以下层及高层 350 hPa 以上。尤以 900 和 800 hPa 上冷平流中心引人注目, 中心值分别小于 $-4 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $-3 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$ 。说明干侵入具有“冷”的性质。同时冷平流已叠置在气旋中心 500 hPa 以下层暖平流之上。从沿 118°E 经向湿正压项(MPV_1)和 θ_{se} 垂直剖面图(图 6a)上可见, 与干侵入下沉气流对应的气旋中心区南北两侧对流层上部出现向下伸展的高 PV 舌区, 1 PVU 等值线已分别到达 600 和 800 hPa 层上; 在中低层气旋的低涡环流区(暖输送带的中低层湿空气内)也为高 PV 区, 1PVU 线集中在 400~900 hPa 之间, 中高层的高位涡气流在低空急流的作用下向北向上输送, 该大值位涡区与高层不断向下扩展的高值区连通, 逐渐形成了一片宽阔的高位涡舌区, 即高位涡干冷空气与暖湿空气交汇形成斜压锋区, 产生斜压不稳定。而从位温场可看出, 在 $35^\circ \sim 50^\circ\text{N}$ 间从高空向低空出现一个陡峭的等 θ_{se} 密集区, 中低层 θ_{se} 线几乎与等熵面垂直, 反映了等熵面具有明显的倾斜特征, 其倾斜面越大, 为了保持湿位涡守恒, 气旋涡度发展越剧烈, 这种涡度的增长被称为倾斜涡度发展(SVD)^[20]。同时对应气旋中心附近的南侧上空大位涡舌区, 在 400~750 hPa 层存在一个 θ_{se} 线上凸舌区(等熵面上凸), 这是在高空冷平流的作用下, 引起高层干侵入气流下沉而产生增温效应所致, 并与气旋中心附近 800 hPa 以下层 280 K 大值中心相连通。但是冷平流太强, 在高层大值位涡线密集区前沿到中低层气旋的低涡后部 400~700

hPa 层间还存在一个 θ_{se} 线下凹 V 形区, 即 $\frac{\partial \theta_{se}}{\partial p} < 0$,

假相当位温线这种凹凸起伏变化反映在气旋上空水平方向上温度比邻近地区低的现象, 也表征大气层结不稳定, 这与寿绍文、姚秀萍等^[21-22] 研究结果一致。而由 $MPV_1 = -g(\zeta_p + f) \frac{\partial \theta_{se}}{\partial p}$ 式可知, 因位涡是守恒的, 故大气静力稳定度下降时绝对涡度是增大的。那么, 在干侵入气流向气旋中心上空下沉的过程中所携带不断上升的绝对涡度使气旋中心上空正涡度平流不断加强, 上层辐散场也随着加强, 根据质量补偿原理, 低层辐合也将增强, 从而导致地面气旋发展。同时, 在水汽图像上(图 3)可显示, 干侵入已推进和输送带的暖湿空气汇合, 造成强的水平变形区, 干区头部逐渐出现向左右两侧的气流分量, 使干侵入形成了一个明显斧形干区, 这时干侵入气流沿着斧形干区头部向极一侧的气流分量下沉进入气旋中心上空, 上空气温再降低。至此, 在冷平流效应的作用下, 高纬度高空的干冷气流沿陡峭等 θ_{se} 线下滑, 使中低层气旋性涡度增强, 促使上升运动迅速加强, 从而促使地面气旋环流发展, 也为强降水提供极为有利的条件。

到了 4 日 12 时, 气旋中心南侧下传的大位涡舌主要在 500 hPa 以上层, 并已趋于水平状态, 其以下中层仅残存一小块大值区, 表明已明显减弱。而气旋的低压位涡大值区一部分并入气旋中心北侧大值区中, 在气旋中心附近 900~700 hPa 层间有一个大于 1 PVU 中心, 强度亦减弱。较强的大值位涡舌位于气旋中心北侧 10 个纬度内。此时的等熵面倾斜度仍较大, 850 hPa 以下低层 θ_{se} 线与等熵面垂直, 气旋中心 850~700 hPa 上空可见到平浅 θ_{se} 线下凹舌区, 260 K 小值区位于气旋北侧 5 个纬度处。其上 900~500 hPa 层有向北翘的 θ_{se} 大值区(图 6b)。此 θ_{se} 场分布特征说明从气旋环流外围侵入黄河气旋中心的干冷空气已逐渐伴随涡旋运动被卷到气旋的前部和北部。意味着气旋发展将减缓直到停滞。

其因是在绝热无摩擦的饱和大气中湿位涡守恒, 则:

$$\frac{d\zeta_{MPV}}{dt} = 0$$

由于正压位涡比斜压位涡大得多, 因此上式可写为:

$$\frac{d\zeta_{MPV_1}}{dt} = 0, \text{ 即: } \frac{\partial \zeta_{MPV_1}}{\partial t} = -V \cdot \nabla(\zeta_{MPV_1})$$

上式说明, 湿位涡的变化是由湿位涡的平流变化造

成。由上式中可见,湿位涡的变化不仅与风速有关,还与湿位涡的水平梯度、垂直速度有关。因垂直速度较小,则湿位涡的平流变化主要由水平平流决定。这揭示了气旋发展阶段湿位涡线呈倒圆锥形下伸的原因。当湿位涡下伸中心位于气旋西部, $-V \cdot \nabla(\zeta_{MPV_1}) > 0$, 水平湿位涡梯度也较大, $\frac{\partial \zeta_{MPV_1}}{\partial t} > 0$, 有利于气旋发展;当湿位涡下伸中心位于气旋中心时, $-V \cdot \nabla(\zeta_{MPV_1}) = 0$, $\frac{\partial \zeta_{MPV_1}}{\partial t} = 0$, 气旋发展停滞;当湿位涡下伸中心位于气旋东部时, $-V \cdot \nabla(\zeta_{MPV_1}) < 0$, $\frac{\partial \zeta_{MPV_1}}{\partial t} < 0$, 不利于气旋发展。

2.4 干侵入在湿度场上的特征

从水汽图像(图 3)和 315 K 等熵面的相对湿度分布(图 7)发现,小于 60% 的相对湿度与水汽图像上的干区较一致。参考 Browning 等^[16] 对于侵入的描述,以相对湿度(RH) ≤ 60% 来表征干侵入气流。为能更直观地了解干侵入的变化特征,从 315 K 等熵面上相对湿度、高度和流场的二维空间结构图(图 7)可见,在 30°~45°N、100°~120°E 范围内等熵面上形成了一个等高线密集带(即等熵面陡峭区),干气流从等高线脊区向东南方下滑,湿气流则从谷地向偏北方向爬升,干、湿两支气流在黄河下游一带交

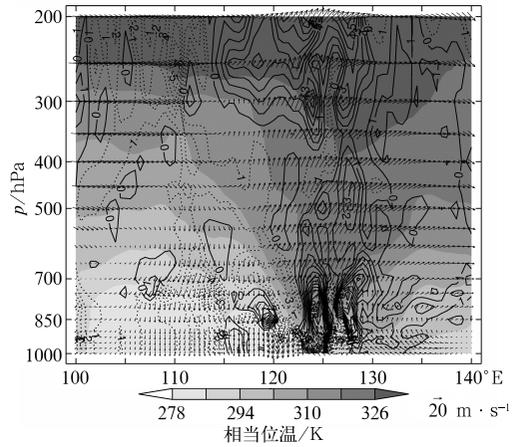


图 5 2007 年 3 月 4 日 06 时沿气旋中心(39°N) 相当位温(阴影区,单位:K)、温度平流 (单位:10⁻⁴ °C · s⁻¹,虚线是冷平流、实线是暖平流)和水平风场(单位:m · s⁻¹) 纬向垂直剖面

Fig. 5 Vertical cross section along zonal direction (the center of cyclone (39°N)) of the equivalent potential temperature (shading, unit: K), the temperature advection (unit: 10⁻⁴ °C · s⁻¹, the dashed (solid) lines show the cold (warm) temperature advection) and the wind vector (zonal wind (unit: m · s⁻¹) and vertical wind (unit: cm · s⁻¹)) at 0060 UTC 4 March 2007

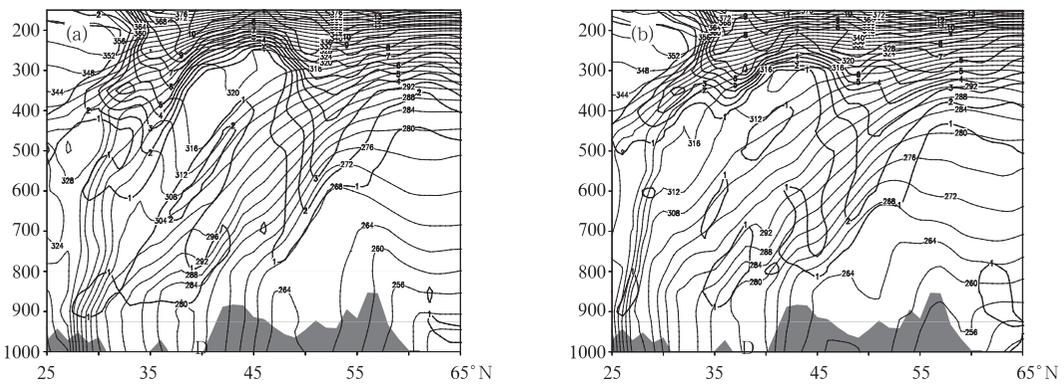


图 6 2007 年 3 月 4 日 06 时(a)和 4 日 12 时(b)沿 118°E 的 MPV₁(深黑色线)和 θ_{sc}(细黑色线)经向剖面 D 代表气旋中心位置

Fig. 6 Cross sections along 118°E of MPV₁ (thick black lines) and θ_{sc} (thin black lines) at (a) 06:00 UTC 4 Mar. and (b) 12:00 UTC 4 Mar. 2007

D is the position of cyclone center

汇,气旋在密集带的右前方开始发展。3 日 18 时,在我国黄河上游到蒙古国中西部地区为一致的干冷气流(图 4a),这支高位涡气流有规律地向东南方移

动,在高位涡气流舌区的西北部的 700~500 hPa 上为冷平流($-V \cdot \nabla T < 0$);东部为暖平流($-V \cdot \nabla T > 0$);在冷平流的作用下,高层的干冷空气下沉

南侵为气旋的发展提供了有利条件。从 RH 的分布来看,在气旋西北方向存在 $RH \leq 60\%$ 的干侵入气流。这支气流的干区向东南方向移动,干区前沿的相对湿度梯度最大。同时,由于西南暖湿气流加强,气旋开始发展,气旋中心位于 $RH > 60\%$ 的湿区中,在初期到最盛期(图 7a~图 7c)的发展过程中,干区内盛行一支强西北气流。到 4 日 06 时,一舌状干冷西北气流继续向东南方向下滑,4 日 18 时这支西北气流沿着等高线折叠区被卷入,“S”型左右两侧的干、湿气流开始相互缠绕,与 3 日 18 时相比,已经有干冷西北气流被卷入气旋中心内部,到 5 日 00 时,气旋在其发展到强盛期后期(图 7d),干区内的西北气流继续气旋式旋转。形成“6、9”型干湿缠绕

混合区。 $RH \leq 60\%$ 的干区一直南伸至江南地区。在气旋发展过程中,在 315 K 等熵面上(图 7)干侵入气流随着干区东移到 $120^\circ E$ 附近逐渐靠近气旋中心,当东移至 $123^\circ E$ 附近,干侵入气流卷入气旋中心,地面气旋位于高层干冷气流的下方,在气旋上空出现了“上干冷下暖湿”的层结分布(图 5),可导致 $\frac{\partial \theta_{se}}{\partial p} < 0$,使得对流性不稳定得以发展,同时,气旋以西的气流穿越等压面下沉,其携带的冷平流,对气旋的发生发展也起了一定作用。从而黄河气旋爆发性发展。此外,干侵入能够引起地面气旋降水区上空不同程度的冷平流降温,导致垂直方向上的温差增大,使得气旋降水区的对流不稳定增强,加强了湿

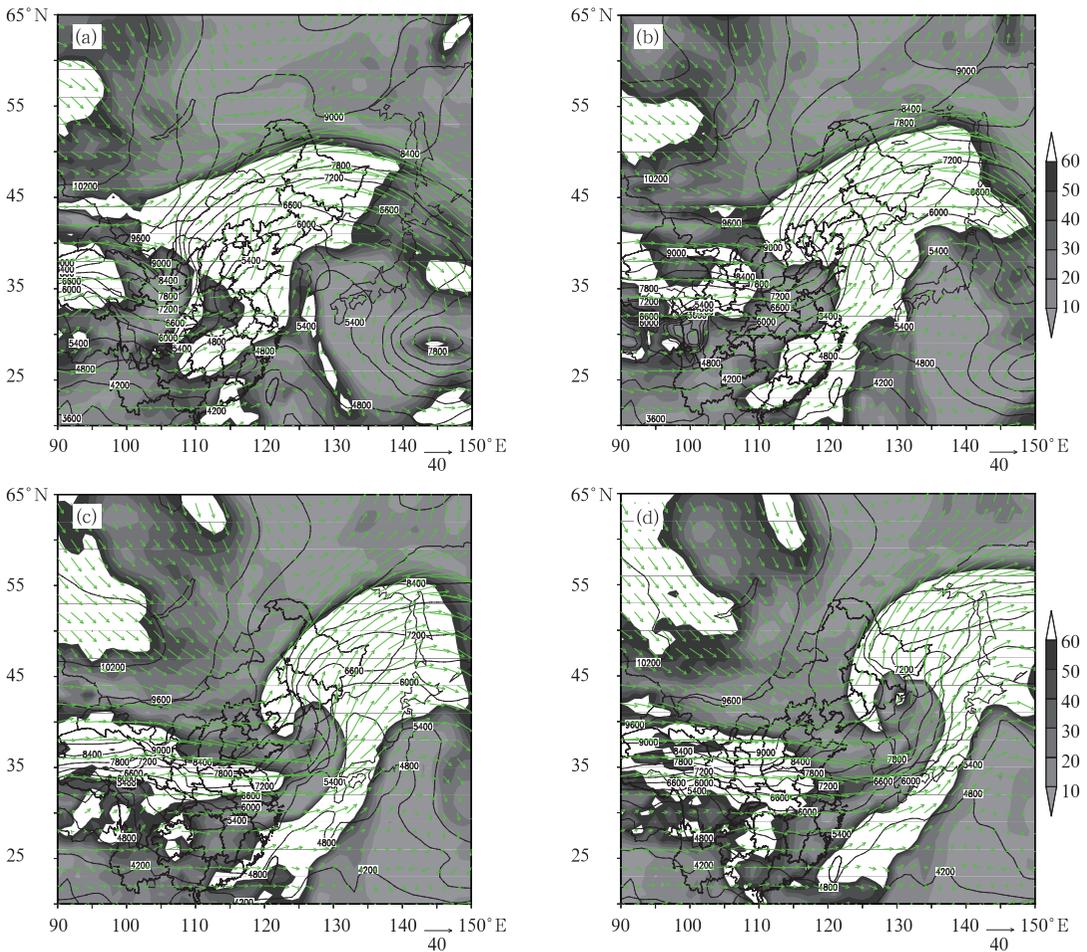


图 7 315 K 等熵面相对湿度(阴影区)、位势高度场(实线)和风场(箭矢)合成图
 (a)2007 年 3 月 3 日 18 时, (b)4 日 06 时, (c)4 日 18 时, (d)5 日 00 时
 D 代表气旋中心位置

Fig. 7 Composite charts of relative humidity (shaded), geopotential height (solid lines) and wind field (arrow lines) at 315 K isentropic surface at (a) 18:00 UTC 3 March, (b) 06:00 UTC 4 March, (c) 18:00 UTC 4 March, and (d) 00:00 UTC 5 March
 D is the position of cyclone center

不稳定的发展,对雨雪的发生发展起着增幅作用^[23-24]。

3 结 论

利用数字化的 6.7 μm 卫星水汽图像和 NCEP/NCAR 再分析资料,分析了 2007 年 3 月 3—5 日诱发渤海强风暴潮黄河气旋的干侵入若干特征,得到以下几点结论:

(1) 这次渤海强风暴潮是在泰米尔半岛附近的不稳定小槽东移发展,东亚大槽重建的过程中发生的,是黄河气旋爆发性发展引发强东北大风所致。对流层高层干侵入下沉至低层与湿上升气流相互缠绕,对气旋发生发展起着重要作用。

(2) 干侵入具有高位涡(PV)和低假相当位温(θ_{sc})特征,位涡等值线密集区同水汽图像上的暗区相对应,其形态和强度变化特征对黄河气旋发生、发展和成熟阶段有预报指示意义。当干侵入的大值位涡移到气旋中心附近时,气旋迅速发展;气旋干、湿结合的核区出现干湿缠绕的“6、9”型结构,是气旋中心附近干侵入和湿气流的理想概念模型;位涡和暗区向气旋中心卷入,预示气旋锢囚。

(3) 在等熵面上,高低纬度的干冷气流和暖湿气流分别沿“ Ω ”型皱折带等位势高度线南北流动时,使得等熵面陡峭程度加大。相对湿度小于 60% 的干冷气流沿等熵面从高层向低层下滑,而相对湿度大于 60% 的暖湿气流沿等熵面爬升,大气斜压性增大,对流稳定度减小,促使中低层垂直涡度发展;而当高层干侵入气流下沉,尽管会产生增温效应,但在下沉运动和强冷平流效应的共同作用下,在高层大值位涡线密集区前沿到中低层低涡后部出现水平方向温度比邻近地区低的现象,大气静力稳定度变小,绝对涡度($\zeta_p + f$)增大,促使中低层气旋性涡度增强,上升运动迅速加强,地面气旋强烈发展,也为强降水提供极为有利的条件。

参考文献

- [1] 王喜年. 关于温带风暴潮[J]. 海洋预报, 2005, 22(增刊): 17-23.
- [2] 胡欣, 景华, 王福侠, 等. 渤海湾风暴潮天气系统及风场结构个例分析[J]. 气象科技, 2005, 33(3): 235-239.
- [3] Patrick Santurette, Christo, G Georgiev. 卫星水汽图像和位势涡度场在天气分析和预报中的应用[M]. [法]帕特里克 桑特里特, [保]克里斯托 G 乔治夫. 方翔等译. 北京: 科学出版社, 2008.
- [4] 杜惠良, 刘建勇, 钮学新. 0216 号台风(森拉克)路径分析[J]. 热带气象学报, 2004, 20(3): 281-288.
- [5] Spencer P L, Stensrud D J. Simulation flash flood events: Importance of the subgrid representation of convection[J]. Mon Wea Rev, 1998, 126(11): 284-292.
- [6] Browning K A. The dry intrusion perspective of extra-tropical cyclone development[J]. Meteorol Appl, 1997, 4(4): 317-324.
- [7] Browning K A, Clough S A, Davitt C S A. Observation of the mesoscale substructure in the cold air of a developing front cyclone[J]. Quart J Roy Meteor Soc, 1995, 121: 1229-1254.
- [8] McCallum E, Clark G V. Use of satellite imagery in a marked cyclogenesis on 12 November 1991[J]. Weather, 1992, 46: 241-246.
- [9] Young M V, Monk G A. Extratropical cyclones—a forecaster's perspective[J]. Meteorol Appl, 1997, 4: 293-308.
- [10] Young M V. A classification scheme for cyclone life cycles: Applications in analysis and short period forecasting[C]. Proc. of Conference on the Life Cycles of Extratropical Cyclones, Vol III, 277 Jun-July 1994, Bergen, 380-385.
- [11] Rogers E, Bosart L F. An investigation of explosively deepening oceanic cyclones[J]. Mon Wea Rev, 1986, 114: 702-718.
- [12] Hoskins B J. The role of potential vorticity symmetric stability and instability[J]. Quart J Roy Meteorol, 1974, 100: 480-482.
- [13] Davis C A, Emanuel K A. Potential vorticity diagnostics of cyclogenesis[J]. Mon Wea Rev, 1991, 119(8): 1929-1953.
- [14] 吕梅, 陆汉城. 春季江淮气旋发展诊断研究[J]. 气象科学, 1997, 17(1): 10-16.
- [15] 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.
- [16] Browning K A, Golding B W. Mesoscale aspects of a dry intrusion within a vigorous cyclone[J]. Quart J Roy Meteor Soc, 1995, 121: 463-493.
- [17] 杨大升, 刘玉斌, 刘式适. 动力气象学[M]. 北京: 气象出版社, 1980: 185-186.
- [18] 于玉斌, 姚秀萍. 干侵入的研究及其应用进展[J]. 气象学报, 2003, 61(6): 769-778.
- [19] 吴国雄, 蔡雅萍. 风垂直切变和下滑倾斜涡度发展[J]. 大气科学, 1997, 21(3): 273-282.
- [20] 吴国雄, 蔡雅萍, 唐晓青. 湿位涡和倾斜涡度发展[J]. 气象学报, 1995, 53(4): 387-405.
- [21] 寿绍文. 位涡理论及其应用[J]. 气象, 2010, 36(3): 9-18.
- [22] 姚秀萍, 吴国雄, 赵兵科, 等. 与梅雨锋上低涡降水相伴的干侵入研究[J]. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2007, 37(3): 417-428.
- [23] 尤红, 肖子牛, 王曼, 等. 2008 年“7.02”滇中大暴雨的成因诊断与数值模拟[J]. 气象, 2010, 36(1): 7-16.
- [24] 张志刚, 金荣花, 牛若芸, 等. 干冷空气活动对 2008 年梅雨降水的作用[J]. 气象, 2009, 35(4): 25-33.