

周淑玲, 闫景鹏, 丛美环. 11月初北黄海一次海龙卷风暴的中尺度特征分析[J]. 海洋气象学报, 2020, 40(4): 42-51.
ZHOU Shuling, YAN Jingpeng, CONG Meihuan. Analysis of mesoscale characteristics of a waterspout storm over northern Yellow Sea in early November[J]. Journal of Marine Meteorology, 2020, 40(4): 42-51. DOI: 10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2020.04.005. (in Chinese)

11月初北黄海一次海龙卷风暴的中尺度特征分析

周淑玲¹, 闫景鹏², 丛美环¹

(1. 威海市气象局, 山东 威海 264200; 2. 济南市章丘区气象局, 山东 济南 250200)

摘要: 利用多普勒天气雷达资料及反演风场和常规观测资料, 对2014年11月2日发生在北黄海(山东半岛北部海上)一次罕见海龙卷风暴的中尺度特征进行了分析。结果表明: 冷空气、暖湿海面热力边界、山东半岛北部近海岸西北风与偏西风的辐合线是海龙卷风暴发生的天气背景。海龙卷风暴发生时雷达回波PPI最大分贝反射率因子为60 dBZ, 高度为2.0 km, 最高风暴顶为4.5 km, 最大垂直累积液态水含量VIL为 $21 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 。利用雷达反演风场进行中尺度特征分析, 结果表明: 在海龙卷风暴发生发展过程中, 低层风辐合对应4.0 km高度上是风辐散, 海上有较强的偏南暖湿气流输送到雷暴区。中尺度动力特征: 最大正涡度和散度辐合在1.0 km以下, 低层正涡度和散度辐合、高层散度辐散是雷暴发生初期动力特征; 低层没有正涡度和散度辐合、高层为正涡度和散度辐合是雷暴开始发展的动力特征; 低层和高层为大的正涡度和散度辐合是雷暴成熟阶段的动力特征。高空冷空气叠加上低空强的偏南气流, 造成局地涡度加大和低层辐合加强, 使低层暖湿气流倾斜上升。海龙卷与辐合区的冷空气和暖湿气流有关。

关键词: 海龙卷; 龙卷; 中尺度特征; 山东半岛; 多普勒雷达反演风场; 北黄海

中图分类号: P445.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-3599(2020)04-0042-10

DOI: 10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2020.04.005

Analysis of mesoscale characteristics of a waterspout storm over northern Yellow Sea in early November

ZHOU Shuling¹, YAN Jingpeng², CONG Meihuan¹

(1. Weihai Meteorological Bureau, Weihai 264200, China; 2. Zhangqiu Meteorological Bureau of Jinan, Jinan 250200, China)

Abstract Using Doppler weather radar data, retrieved wind field by single radar, and routine sounding and surface observations, the mesoscale characteristics of the occurrence and evolution of a waterspout storm over the northern Yellow Sea (off the coast of northern Shandong Peninsula) on 2 November 2014 are analyzed. Results show the incoming cold air, thermal boundary of the warm and moist air from the Yellow Sea, and convergence line between northwesterly and westerly winds on the coast of northern Shandong Peninsula are conducive to the occurrence of the waterspout storm. When the waterspout storm occurs, the maximum decibel reflectivity factor of radar PPI is 60 dBZ, the height of the maximum reflectivity is 2.0 km, the highest top of the storm is 4.5 km, and the maximum vertically integrated liquid (VIL) is $21 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$. The mesoscale characteristics of the wind field retrieved by single radar show there is wind convergence in the lower layer corresponding to wind divergence at 4.0 km and stronger southerly warm and moist air is conveyed from sea areas to the thunderstorm area during the

收稿日期: 2020-07-13; 修订日期: 2020-10-27

基金项目: 山东省气象局科研项目(2019sdqxm21); 环渤海区域科技协同创新基金项目(QYXM201708)

通信作者: 周淑玲, 女, 正高级工程师, 主要从事短期短临天气预报和暴雨雪的分析及研究, whzhoushul@qq.com。

occurrence and development of the waterspout storm. Mesoscale dynamic characteristics are that the maximum positive vorticity and convergence are below 1.0 km, and the dynamic characteristics at the initial stage of thunderstorm are positive vorticity and convergence in the lower layer and divergence field in the upper layer; the dynamic characteristics of developing thunderstorm are positive vorticity and convergence in the upper layer while there are no positive vorticity and convergence in the lower layer; the dynamic characteristics of mature thunderstorm are positive vorticity and convergence in the lower and upper layer. The cold air in the upper layer and the strong southerly air flow in the lower layer result in higher local vorticity and stronger convergence in the lower layer, which makes the warm and moist air in the lower layer ascend slantwise. The waterspout relates to the cold air and warm and moist air flow in the convergence area.

Key words waterspout; tornado; mesoscale characteristics; Shandong Peninsula; retrieved wind field by single Doppler radar; northern Yellow Sea

引言

龙卷是对流风暴产生的最猛烈的天气现象,常与雷暴大风、冰雹、暴雨等强对流天气一起出现,是一种强烈的涡旋现象,影响范围小,持续时间短,但来势凶猛,破坏力强。统计发现 1961—2010 年全国共记录到 165 次强龙卷,龙卷具有某地频发的特征^[1]。根据龙卷生成的位置,漏斗云柱从对流云云底盘旋而下伸达地面的称为龙卷,伸达水面的称为水龙卷(海龙卷)。中国对龙卷的研究目前处于起步阶段,冯佳玮等^[2]统计了 2004—2012 年的中国龙卷,发现龙卷多发生于我国东部沿海地区的春夏季,薛德强和杨成芳^[3]统计了 1950—2000 年山东省龙卷发生的气候特征,发现山东半岛为发生龙卷次数较多的地区之一,夏季龙卷发生次数最多(占 74.3%),春、秋季次之,11 月、12 月和 1 月的发生次数为 0,龙卷主要发生在午后到傍晚。龙卷观测和研究最常用的工具是雷达,近几年随着多普勒雷达资料、地面加密观测资料、数值模拟等的应用,使得龙卷中小尺度对流特征的观测、识别等研究得到开展^[4-9],许多气象工作者对台风外围环流的龙卷开展了研究^[10-13],陈列等^[14]利用 VPP 法反演单多普勒雷达风场,用 UV 风速替代径向风速进行 TVS 计算判断来识别龙卷,为防止龙卷漏测提供一种有价值的方法。海龙卷可以发生在各种天气系统或几种天气系统情况下温暖或寒冷的水域,大多数发生在温暖的水域,通常发生在大片陆地的背风海岸附近^[15],国外学者 MIGLIETTA et al.^[16]利用多普勒雷达对 2017 年 12 月 1 日发生在意大利西北部地中海近岸的两个海龙卷进行了观测分析,发现海龙卷发生在冷空气和暖湿气流的辐合区,在雷达径向速度

图像上对应有中气旋和径向速度对。目前能观测到的海龙卷个例有限,加上观测资料的限制,对海龙卷的研究比较少。山东半岛北临渤海和北黄海,特殊的地理位置决定这里的灾害性天气比较特殊,如冬季冷流暴雪、雷暴龙卷等。2014 年 11 月 2 日上午发生在北黄海(山东半岛北部海上)近海岸海龙卷的个例被威海市民观测到,距离烟台雷达站 50 km 左右。由于本次海龙卷母体位置不易确定,本文拟利用烟台多普勒雷达观测资料及反演风场,对造成这次罕见海龙卷的雷暴单体中尺度特征进行分析,以期加深对这类天气的认识,为山东半岛近海岸海龙卷的预报预警提供一些参考。

1 资料与天气实况

1.1 资料与方法

选取多普勒雷达观测资料、常规和地面加密观测资料。

多普勒雷达资料反演风场方法:利用烟台多普勒雷达的观测资料进行反演,该雷达位于 37.500°N, 121.388°E,海拔高度 0.41 km,其扫描时间间隔为 6 min,每个体扫含 9 个仰角,最低仰角为 0.5°,方位角分辨率为 1°。径向速度和反射率因子分辨率为 1.0 km,探测半径为 230 km。反演风场采用 EVAP 方法^[17],反演的格距为 0.009 6°,X、Y 方向各为 351 个格点,垂直分层间隔 0.2 km。该方法反演风场的可靠性在山东半岛冷流暴雪的应用中已进行了检验^[18]。

1.2 实况

2014 年 11 月 2 日 10:15,威海市民孙先生坐车行驶至威海市区世昌大道西首(靠近威海市高新区西部海边)突然看到车外出现冰雹,他透过车窗,看

到远处的天空中,一片乌云下方,一道细长的“水柱”往地面延伸,即“龙吸水”现象,他用手机记录下这罕见的海龙卷伴有冰雹的强对流天气现象,冰雹直径在 2 cm 以下,但降雹密度较大(图 1)。本次龙

卷强对流天气过程降水量较小,最大降水量出现在威海市区,为 7.6 mm。对流风暴影响时,威海市区出现风力 8 级(风速 $19.6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)的雷暴大风,气温降幅为 $4.3 \text{ }^{\circ}\text{C}$,相对湿度为 49%。

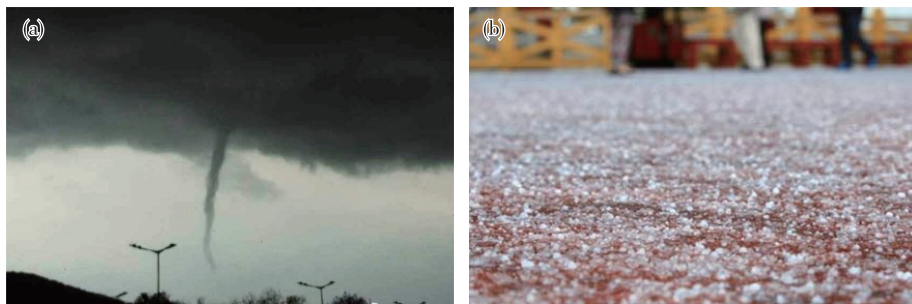


图 1 2014 年 11 月 2 日 10:15 前后在威海市观测的海龙卷(a)和冰雹(b)照片

Fig.1 Waterspout (a) and hail (b) observed in Weihai around 10:15 BST 2 November 2014

2 天气背景特征

2.1 天气形势

分析 2014 年 11 月 2 日 08 时海龙卷发生前的天气形势,寻找造成海龙卷的环流背景特征。

2 日 08 时,海龙卷发生前 2 小时,在 500 hPa 图上,新疆到贝加尔湖为一强大的高压脊,高压脊前的北支槽呈近南北走向,底部位于渤海到山东半岛,温度槽稍落后于高度槽,槽后西北风风速大于 $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,山东半岛北部近海 500 hPa 温度为 $-24 \text{ }^{\circ}\text{C}$ (图 2a)。在 850 hPa 图上,北支槽位于日本海到朝鲜半岛北部,温度槽落后于高度槽,槽后有较强冷平流,北黄海到山东半岛为 $16 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的西北风控制,西北风风向和密集的等温线垂直,山东半岛北部近海 850 hPa 温度为 $-2 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右(图 2b)。地面图上,日本海有低压中心,渤海海峡到北黄海地面等压线有气旋性弯曲,渤海海峡到山东半岛有西北风和偏西风的风向辐合,此类风辐合与山东半岛近东西向的海岸线有关(图 2c);10 时加密观测地面图上,长岛为 $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的西北风,烟台到威海为小于 $8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的偏西风(图 2d)。从渤海海峡、北黄海到山东半岛的气旋性辐合利于对流天气的发生、发展。

通过上述分析可知,高空北支冷槽、渤海海峡到北黄海地面等压线气旋性弯曲,山东半岛北部近海的地面辐合线是造成海龙卷的主要天气系统。海龙卷发生时,高、低空为槽后冷空气控制,在冷空气一侧,由于斜压性产生水平涡度较大,容易导致低层气旋性旋转加强,再加上暖湿海面的热力边界和地面辐合线的共同作用,利于低层小气旋的生成

发展和海龙卷天气的发生。

2.2 大气层结稳定度特征

图 3 是 11 月 2 日 08 时荣成的探空曲线,此时高空 500 hPa 冷空气还没影响到荣成探空站,850 hPa 冷空气刚刚过境,荣成的对流有效位能(convective available potential energy, CAPE)值为 0,所以仅从荣成探空站 08 时对流有效位能的分析,很难判断 2 个小时后具有发生强对流的潜势,CAPE 值不能反映海面上空真实的大气环境,与 MIGLIETTA et al.^[16] 研究有类似的特征。由于龙卷风暴发生在海面上,其发生时下垫面气温与 08 时荣成探空站的资料差别较大,所以,利用 10 时海上 10 m 实时观测气温和上海市气象局开发的探空资料分析显示系统对荣成 08 时的探空 $t-\ln p$ 图进行订正。根据威海浮标站(37.5°N 、 122.55°E ,位于对流风暴东侧海面上)11 月 2 日的实时观测资料,10 时海面上 10 m 气温为 $12 \text{ }^{\circ}\text{C}$,订正后 CAPE 值为 $728 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ (图 3b)。可见,龙卷风暴发生时存在较大的对流有效位能。

分析风的垂直廓线,在荣成,1 000 hPa 为 $5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的西北风,925 hPa 为 $16 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的西北偏北风,850~700 hPa 为 $16 \sim 18 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的西北风,500 hPa 为 $34 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的偏西急流,风速随高度增大;垂直风切变比较大,0~1 km 垂直风切变为 $11 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,0~2 km 垂直风切变为 $13 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,0~6 km 垂直风切变为 $30 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。925 hPa 以下低层风向随高度顺时针旋转,风速增大,为暖平流,925 hPa 以上风向随高度逆时针旋转,为冷平流,即 925 hPa 以下为暖湿空气、850 hPa 以上为干冷空气,大气层结具有不稳定性。

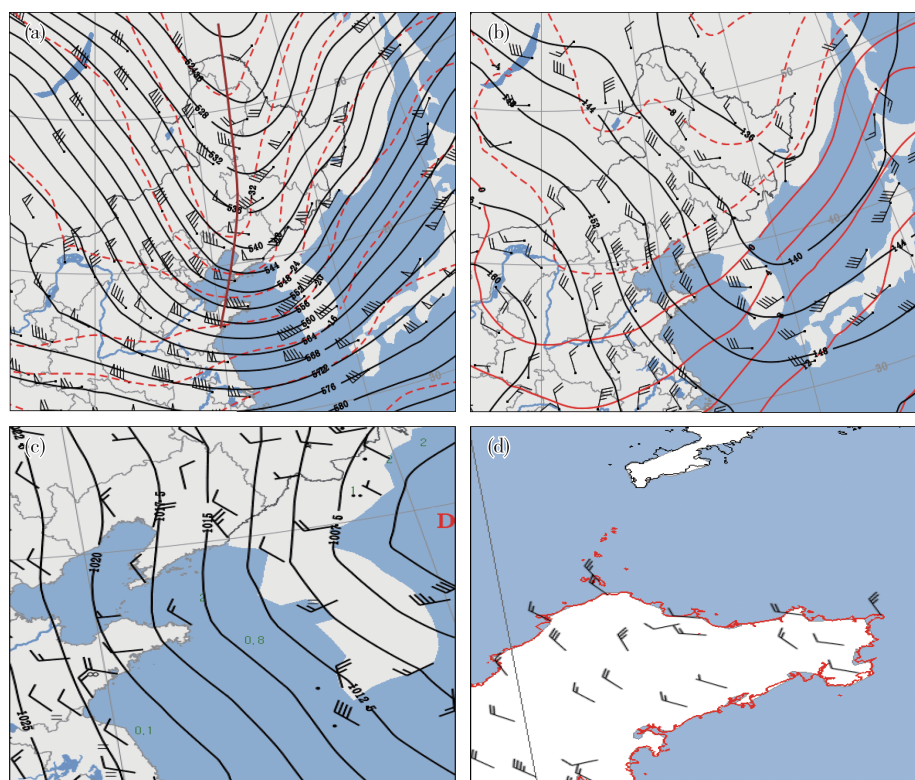


图2 2014年11月2日08时500 hPa天气形势(a)、850 hPa天气形势(b)、地面天气图(c)和10时地面风场(d)(图2a和图2b中,黑线:等位势高度线,单位:dagpm;红线:等温线,单位:℃)

Fig.2 Synoptic situation at 500 hPa (a), synoptic situation at 850 hPa (b), and surface synoptic chart (c) at 08:00 BST and surface wind field (d) at 10:00 BST 2 November 2014 (in Fig.2a and Fig.2b, black line for isoline of geopotential height, units: dagpm; red line for isotherm, units: °C)

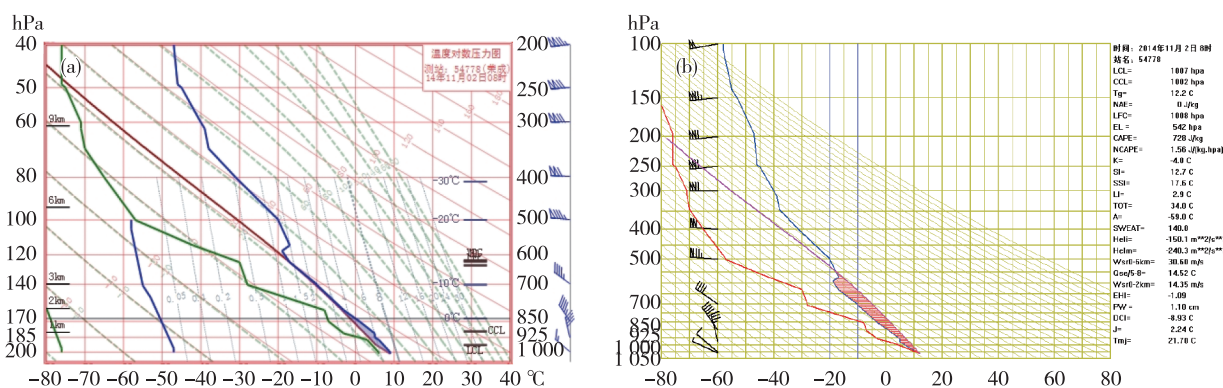


图3 2014年11月2日08时荣成的 t - $\ln p$ 图(a)及利用海上浮标站10时10 m气温订正后的 t - $\ln p$ 图(b)

Fig.3 The t - $\ln p$ diagram at 08:00 BST at Rongcheng Station (a) and revised t - $\ln p$ diagram using air temperature data from buoy station at 10 m at 10:00 BST 2 November 2014 (b)

3 基于多普勒雷达资料的中尺度特征分析

3.1 多普勒雷达回波观测特征分析

图4中红色细线和圆圈是造成海龙卷的强对流风暴移动路径和位置。风暴单体10:00在烟台多普勒雷达站东北方向40~50 km附近(山东半岛北部近海)生成,这个距离也是雷达探测龙卷的有效探

测距离,之后风暴向东南方向移动、发展,在10:12—10:30影响威海。

通过分析雷达0.25 km的0.5°仰角PPI回波,可以看出,10:00在对流风暴单体刚开始发展时,雷达PPI最大分贝反射率因子为45~50 dBZ(图5a),10:06对流风暴单体明显发展,最大分贝反射率因子为50~55 dBZ(图5b),到10:12对流单体风暴继

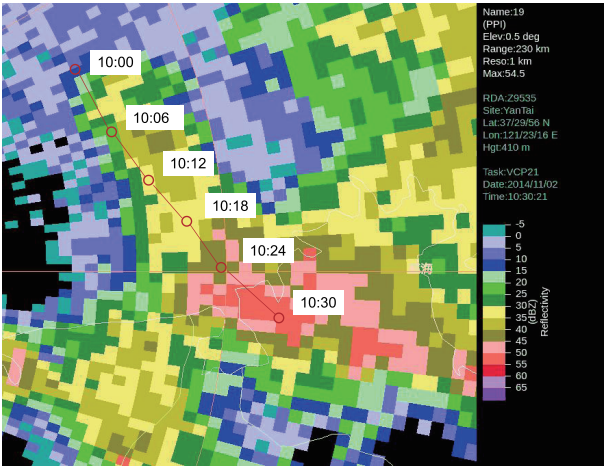


图 4 2014 年 11 月 2 日 10:30 烟台多普勒雷达 PPI 0.5° 仰角分贝反射率因子 R19 产品 (单位: dBZ; 红色细线为 10:00—10:30 海龙卷风暴单体移动路径)

Fig.4 Decibel reflectivity factor (R19) at 0.5° elevation from Yantai Doppler weather radar at 10:30 BST 2 November 2014 (units: dBZ; red thin line for track of waterspout storm from 10:00 BST to 10:30 BST every 6 min)

续发展,最大分贝反射率因子为 55 dBZ,范围明显增大(图 5c),10:18 对流单体风暴靠近威海北部近海时进一步发展,回波强度达到最强,最大为 60 dBZ (图 5d)。可见,本次海龙卷属于非超级单体雷暴造成的。

沿强回波入流方向(移动路径方向)做 PPI 垂直剖面,10:12,50 dBZ 的强回波高度在 5 km 以下(图 6a),60 dBZ 回波 10:18 位于 2 km(图 6b)。

分析龙卷风暴的参数演变特征发现,最高风暴顶高度为 4.5 km,出现在 10:12,风暴底在 0.5 km,最大反射率因子高度为 2.0 km(图 7a);风暴单体垂直累积液态水含量 VIL 为 20~21 kg·m⁻²,最大出现在 10:18,为 21 kg·m⁻²(图 7b)。垂直累积液态水含量代表了风暴的综合强度,美国俄克拉何马州大冰雹对应的 VIL 阈值 6—8 月为 65 kg·m⁻²,11 月为 45 kg·m⁻²^[19],本次对流风暴 VIL 值比较小,仅造成小冰雹天气;风暴单体最大分贝反射率因子为 60 dBZ(图 7c)。

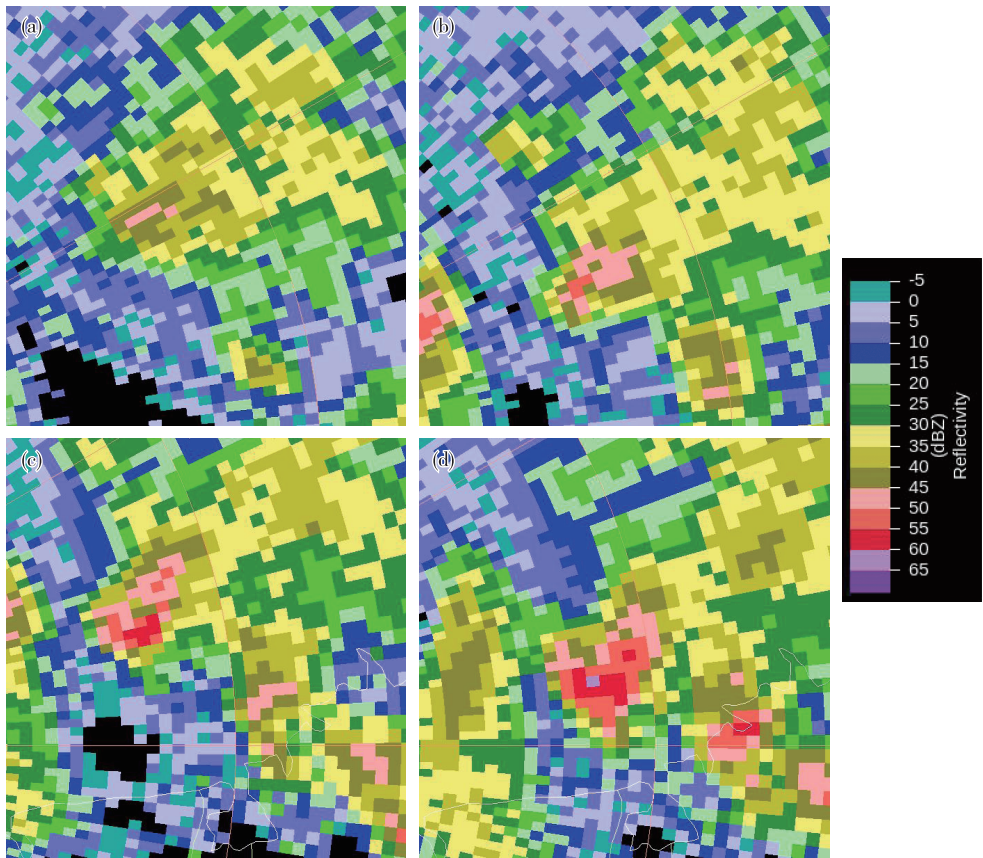


图 5 2014 年 11 月 2 日烟台多普勒雷达 0.5°仰角分贝反射率因子 R19 产品 (单位: dBZ; a. 10:00, b. 10:06, c. 10:12, d. 10:18)

Fig.5 Decibel reflectivity factor (R19) at 0.5° elevation from Yantai Doppler weather radar on 2 November 2014 (units: dBZ; a. 10:00 BST, b. 10:06 BST, c.10:12 BST, d.10:18 BST)

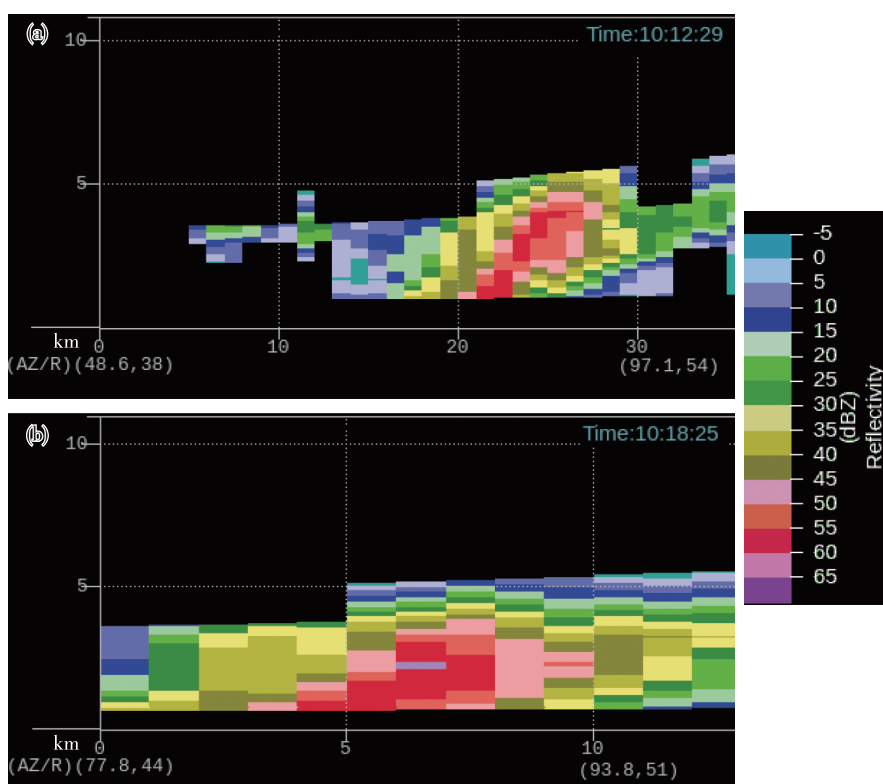


图6 2014年11月2日10:12(a)和10:18(b)沿风暴移动路径做的PPI垂直剖面

Fig.6 Reflectivity cross section (RCS) along track of convective storm at 10:12 BST (a) and 10:18 BST (b) 2 November 2014

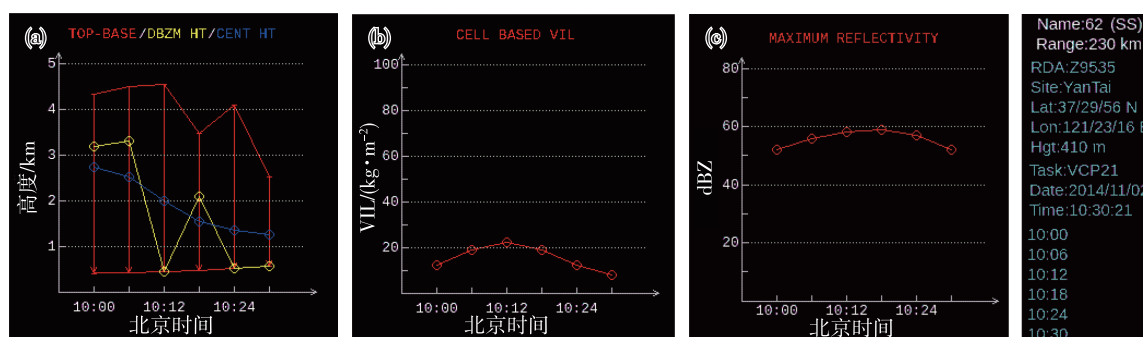


图7 龙卷风暴单体参数的时间演变特征(a.风暴单体底和顶、最大反射率因子高度、质心高度,单位:km;b.基于单体的垂直累积液态水含量(VIL),单位: $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$;c.风暴单体的最大反射率因子,单位,dBZ;图7a中红线表示风暴单体底和顶,黄线表示最大反射率因子高度,蓝线表示质心高度)

Fig.7 Evolution of parameters of tornado storm cell (a. top-base of storm cell in red line, height of the maximum reflectivity in yellow line, height of centroid in blue line, units: km; b. cell-based vertically integrated liquid (VIL), units: $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$; c. maximum reflectivity of storm cell, units: dBZ)

3.2 中尺度特征分析

龙卷沿着空气质量边界形成并伴随大风抬升,与低层水平风切变和垂直涡度局地最大值相联系^[19-20],沿着低层辐合线、锋线、海风锋等也能产生龙卷^[21]。为进一步分析本次海龙卷风暴发生发展的风场结构特征,利用烟台多普勒雷达观测资料反演间隔为 0.0096° 的水平风场和观测的雷达分贝反射率因子叠加,进行中尺度分析。

3.2.1 雷达反演的水平风场时空演变特征

选取0.6 km、1.0 km和4.0 km高度上反演风场来分析海龙卷发生、发展时各高度风场特征。

10:06在0.6 km高度上,雷达回波强度最大为45 dBZ,呈吊坠形,偏南风大于 $12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 并在强回波区辐合,强回波北侧为偏北气流(图8a);在1.0 km高度上,海上较大的偏南气流向北输送到吊坠形回波顶端并在此处辐合(图8b);在4.0 km

高度上,强回波区西侧为西北风和西南风的辐合,对应 1.0 km 高度上为南风风速辐合(图 8c)。10:12 强回波继续发展,在 0.6 km 高度上,雷达回波最大增强为 50 dBZ,有不小于 $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的偏南气流穿过强回波区,低空强的偏南气流为海龙卷

的形成输送暖湿气流(图 8d);在 1.0 km 高度上,南风增大为 $8 \sim 10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 且穿过强回波区(图 8e);在 4.0 km 高度上,西北风与西南风的辐合线穿过强回波中心,高层强回波对应低层南大风流入强回波的入口处(图 8f)。

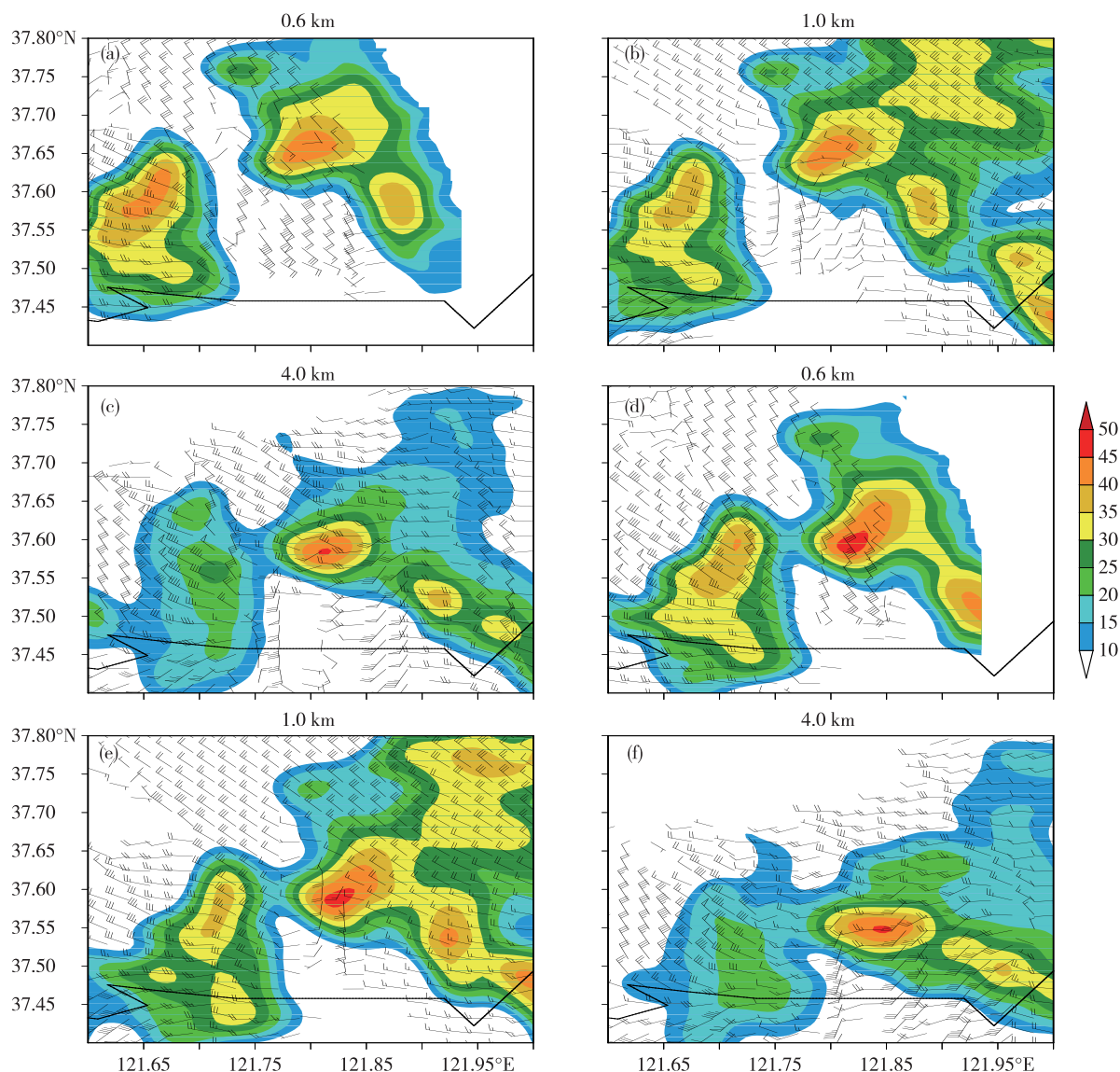


图 8 2014 年 11 月 2 日烟台多普勒雷达资料反演的 0.6 km (a/d)、1.0 km (b/e) 和 4.0 km (c/f) 高度上水平风场(风矢,单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) 和雷达分贝反射率因子(填色,单位: dBZ)的叠加(a/b/c. 10:06, d/e/f. 10:12)

Fig.8 Retrieved wind field (wind barb, units: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) at 0.6 km (a/d), 1.0 km (b/e), and 4.0 km (c/f) by single Doppler radar overlaid with decibel reflectivity factor (colored area, units: dBZ) in Yantai on 2 November 2014 (a/b/c. 10:06 BST, d/e/f. 10:12 BST)

10:18, 雷达回波达到最强, 60 dBZ 回波位于 2.0 km, 在 0.6 km 高度上转为西北气流(图 9a), 2.0 km 高度上强回波区为西北风和西风辐合(图 9b), 2.0~2.6 km 高度上强回波区为西北风和西南风辐合, 2.6 km 以上为西北气流。10:24, 强回波靠

近山东半岛, 高度降低, 1.4 km 以下为西北气流, 0.6 km 高度上西北气流位于强回波西侧(图 9c), 1.6~3.8 km 强回波区为西北风和西南风辐合, 2.0 km 高度上强回波区西北风和西南风辐合较强(图 9d), 4.0 km 以上为西北气流, 此时雷暴处于逐

渐减弱中。

可见,在海龙卷风暴发生发展过程中,低层风辐合对应 4.0 km 高度上是风辐散,海上较强的偏南

暖湿气流输送到雷暴区。在海龙卷风暴减弱时,1.0 km 以下变为西北气流,2.0 km 变为西北风和西南风辐合,4.0 km 以上为西北气流。

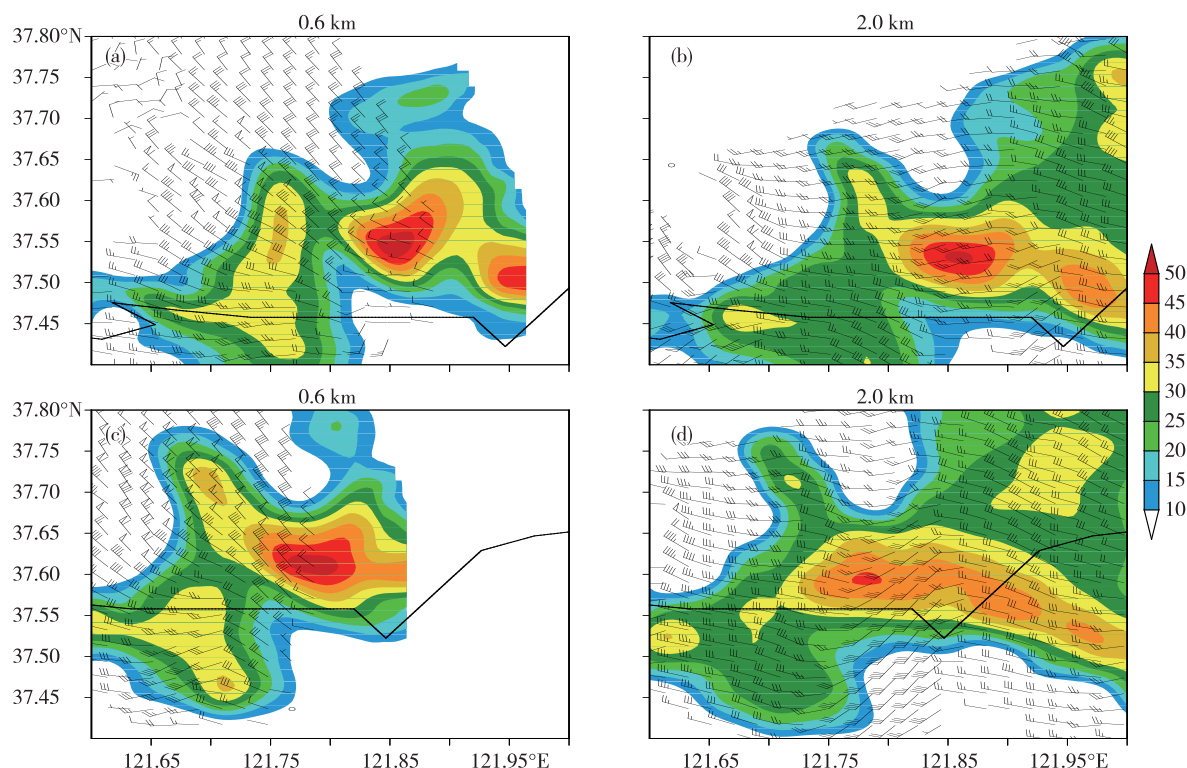


图9 2014年11月2日烟台多普勒雷达资料反演的0.6 km(a/c)和2.0 km(b/d)高度上水平风场(风矢,单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)和雷达分贝反射率因子(填色,单位:dBZ)的叠加(a/b. 10:18; c/d. 10:24)

Fig.9 Retrieved wind field (wind barb, units: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) at 0.6 km (a/c) and 2.0 km (b/d) by single Doppler radar overlaid with decibel reflectivity factor (colored area, units: dBZ) in Yantai on 2 November 2014 (a/b. 10:18 BST, c/d. 10:24 BST)

3.2.2 中尺度动力特征

由3.1节分析可知,最高风暴顶高度为4.5 km,所以选取4 km以下雷达反演风场计算的涡度和散度来分析海龙卷风暴生成发展的动力特征。

在海龙卷风暴中心附近,10:00,在0.6 km高度上,出现正涡度,最大涡度为 $20 \times 10^{-3} \text{s}^{-1}$;在散度场上,散度辐合与正涡度相对应,最大负散度为 $-15 \times 10^{-3} \text{s}^{-1}$,同时在负散度的南侧有较大的正散度,这反映受高空冷空气和海面暖湿空气的共同影响,气流是倾斜上升的(图10a,矩形黑框为龙卷风暴的位置,下同);在1.0 km高度上,出现正涡度和弱散度辐合(图10b);在4.0 km高度上散度为辐散(图10c)。10:06,在0.6 km和1.0 km高度上,风暴中心附近没有正涡度和散度辐合,说明低层气旋性辐合减弱(图10d、e);在4.0 km高度上,出现正涡度和散度辐合,说明对流风暴往高层发展(图

10f)。10:12,在0.6 km,正涡度和散度辐合再次增强,正涡度为 $20 \times 10^{-3} \text{s}^{-1}$,负散度为 $-15 \times 10^{-3} \text{s}^{-1}$,说明低层气旋性旋转和散度辐合较强(图10g);在1.0 km高度上为正涡度,散度辐合相对较弱(图10h);在4.0 km高度上正涡度和散度辐散都很大,分别为 $25 \times 10^{-3} \text{s}^{-1}$ 和 $-15 \times 10^{-3} \text{s}^{-1}$,说明对流风暴发展正旺盛,在扭曲作用下利于海龙卷的形成(图10i)。10:18,在0.6 km和1.0 km高度上为正涡度,已没有散度辐合,4.0 km高度上为正涡度和散度辐散,此时雷达回波强度达到最大。10:24,低层是弱的正涡度,散度场为辐散,4.0 km高度上为正涡度和散度辐散,雷暴开始减弱(图略)。

可见,海龙卷风暴发展过程中,低层涡度最大值达到 $20 \times 10^{-3} \text{s}^{-1}$,散度辐合最大值达到 $-15 \times 10^{-3} \text{s}^{-1}$,这与中气旋的涡度、散度级别大小相当,最大正涡度及对应最大散度辐合主要在1 km以下。低层正

涡度和散度辐合、高层散度辐散是雷暴发生初期动力特征;低层没有正涡度和散度辐合、高层为正涡度和散度辐合是雷暴开始发展的动力特征;低层和高层为大的正涡度和散度辐合、中层为相对小的正

涡度和散度辐合是海龙卷雷暴成熟阶段的动力特征。高空冷空气叠加上低空大的偏南气流,造成局地涡度加大和低层辐合加强,低层暖湿气流倾斜上升,利于海龙卷的产生。

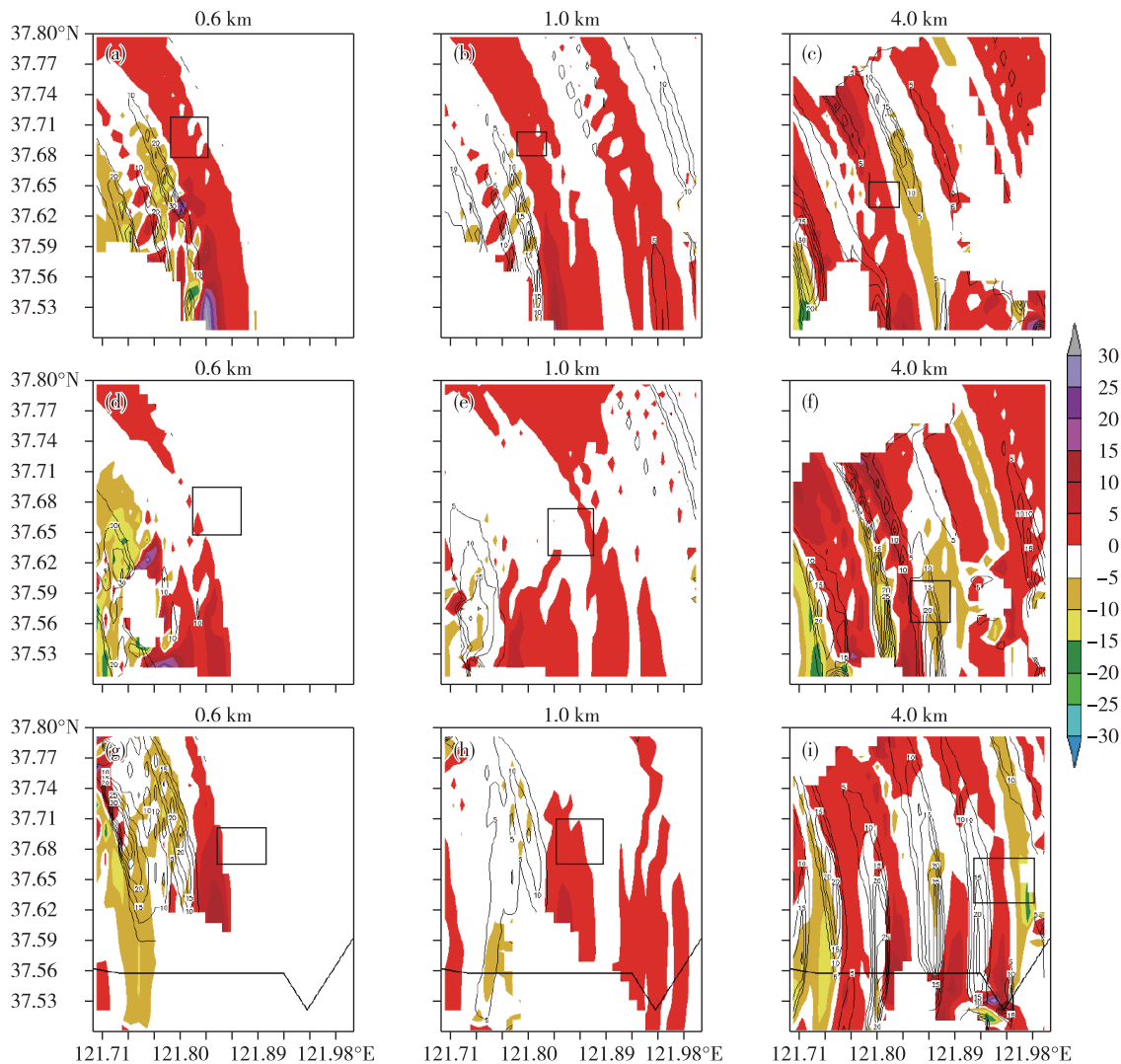


图 10 2014 年 11 月 2 日在 0.6 km (a/d/g)、1.0 km (b/e/h) 和 4.0 km (c/f/i) 高度上多普勒雷达反演的正涡度(黑线,单位: 10^{-3} s^{-1})和散度(填色,单位: 10^{-3} s^{-1})(矩形为海龙卷风暴的位置;a/b/c. 10:00,d/e/f. 10:06,g/h/i. 10:12)

Fig.10 Retrieved positive vorticity (black line, units: 10^{-3} s^{-1}) and divergence (colored, units: 10^{-3} s^{-1}) at 0.6 km (a/d/g), 1.0 km (b/e/h), and 4.0 km (c/f/j) by single Doppler radar in Yantai on 2 November 2014 (rectangle for location of waterspout storm; a/b/c. 10:00 BST, d/e/f. 10:06 BST, g/h/i. 10:12 BST)

4 结论

通过利用常规观测资料、多普勒雷达资料及反演风场对 2014 年 11 月 2 日北黄海(山东半岛北部近海)一次海龙卷风暴的中尺度特征分析,得出如下结论。

1) 高空北支冷槽、渤海海峡到北黄海地面等压

线气旋性弯曲,山东半岛北部近海的地面辐合线是造成海龙卷风暴的主要天气系统。海龙卷发生时,高、低空为槽后冷空气控制,地面冷锋已过北黄海,冷空气移到北黄海暖湿的海面上,在山东半岛北海岸有西北风和偏西风的辐合线。在冷空气一侧,由于斜压性产生水平涡度较大,导致低层气旋性旋转加强,再加上暖湿海面的热力边界和地面辐合线的

共同作用,利于海龙卷风暴的发展。海龙卷风暴发生时海上存在较大的对流有效位能。

2)海龙卷风暴雷达回波 PPI 最大分贝反射率因子为 60 dBZ,高度为 2.0 km;最高风暴顶为 4.5 m,风暴底在 0.5 km,风暴单体垂直累积液态水含量 VIL 最大为 $21 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 。

3)利用多普勒雷达反演风场更精细地分析出海龙卷风暴从近地面到高层不同时间的风场特征。结果表明:在海龙卷风暴发生发展过程中,低层风辐合对应 4.0 km 高度上是风辐散,海上有较强的偏南暖湿气流输送到雷暴区;在龙卷风暴减弱时,1.0 km 以下变为西北气流,2.0 km 变为西北风和西南风辐合,4.0 km 以上为西北气流。

4)中尺度动力特征:龙卷风暴发展过程中,低层涡度最大值达到 $20 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$,散度辐合最大值达到 $-15 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$,这与中气旋的涡度、散度级别大小相当,最大正涡度及对应的最大散度辐合主要在 1.0 km 以下。低层正涡度和散度辐合、高层散度辐散是雷暴发生初期动力特征;低层没有正涡度和散度辐合、高层为正涡度和散度辐合是雷暴开始发展的动力特征;低层和高层为大的正涡度和散度辐合、中层为相对小的正涡度和散度辐合是雷暴成熟阶段的动力特征。

参考文献:

- [1] 范雯杰,俞小鼎.中国龙卷的时空分布特点[J].气象,2015,41(7):793-805.
- [2] 冯佳玮,闵锦忠,庄潇然.中国龙卷时空分布及其环境物理量特征[J].热带气象学报,2017,33(4):530-539.
- [3] 薛德强,杨成芳.山东省龙卷风发生的气候特征[J].山东气象,2003,23(4):9-11.
- [4] 林应,王啸华,顾沛澍,等.2016年夏季如东一次 EF2 级龙卷多普勒天气雷达特征分析[J].气象科学,2018,38(3):392-398.
- [5] 俞小鼎,郑媛媛,张爱民,等.安徽一次强烈龙卷的多普勒天气雷达分析[J].高原气象,2006,25(5):914-924.
- [6] 刁秀广,万明波,高留喜,等.非超级单体龙卷风暴多普勒天气雷达产品特征及预警[J].气象,2014,40(6):668-677.
- [7] 赵海军,刁秀广,王庆华,等.非超级单体龙卷风暴低层流场特征及模拟分析[J].山东气象,2016,36(2):1-9.
- [8] 朱江山,刘娟,边智,等.一次龙卷生成中风暴单体合并和涡旋特征的雷达观测研究[J].气象,2015,41(2):182-191.
- [9] 吴芳芳,俞小鼎,王慧,等.一次黄海之滨中尺度对流复合体多尺度结构特征观测研究[J].气象学报,2019,77(5):785-805.
- [10] 李兆慧,王东海,麦雪湖,等.2015年10月4日佛山龙卷过程的观测分析[J].气象学报,2017,75(2):288-313.
- [11] 何彩芬,姚秀萍,胡春蕾,等.一次台风前部龙卷的多普勒天气雷达分析[J].应用气象学报,2006,17(3):370-375.
- [12] 朱君鉴,蔡康龙,龚佃利,等.登陆台风“摩羯”(1814)在山东引发龙卷的灾情调查与天气雷达识别[J].海洋气象学报,2019,39(4):21-34.
- [13] 刁秀广,孟宪贵,张立,等.台风“摩羯”与“温比亚”环流中龙卷小尺度涡旋特征及可预警性分析[J].海洋气象学报,2019,39(3):19-28.
- [14] 陈列,彭霞云,赵放.利用单多普勒反演风场识别龙卷[J].浙江气象,2010,31(4):9-12,16.
- [15] 邹友家.水龙卷简介[J].世界海运,2000,23(4):11-14.
- [16] MIGLIETTA M M, ARAI K, KUSUNOKI K, et al. Observational analysis of two water spouts in northwestern Italy using an OPERA Doppler radar[J]. Atmos Res, 2020,234:104692.
- [17] 王俊.单多普勒天气雷达反演二维风场的方法研究[J].青岛:中国海洋大学,2004.
- [18] 杨成芳,李泽椿,王俊.用 EVAP 方法反演冷流暴雪的风场及检验[J].气象学报,2010,68(4):577-583.
- [19] 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.
- [20] 俞小鼎,姚秀萍,熊廷南,等.多普勒天气雷达原理与业务应用[M].北京:气象出版社,2006.
- [21] 洛莫夫 A И,冯瑞炤.龙卷的形成[J].气象科技,1988,16(6):11-15,39.