

刁秀广, 万明波, 高留喜, 等. 2014. 非超级单体龙卷风暴多普勒天气雷达产品特征及预警. 气象, 40(6): 668-677.

非超级单体龙卷风暴多普勒天气 雷达产品特征及预警^{*1}

刁秀广 万明波 高留喜 孟宪贵

山东省气象台, 济南 250031

提 要: 利用济南和烟台多普勒天气雷达资料, 结合环境物理量和天气实况, 对发生在山东境内的 6 个非超级单体龙卷风暴特征进行了分析。6 个非超级单体龙卷风暴产生于 5 次天气过程, 其中 4 次过程属于后倾槽结构, 1 次是西北气流结构。6 个非超级单体龙卷中 EF0 级龙卷 2 次, EF1 级龙卷 3 次, EF2 级龙卷 1 次。综合分析结果表明, 低层大的湿度和 0~1 km 垂直风切变 $\geq 7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 是非超级单体龙卷发生的有利条件。平均径向速度产品上, 方位上相邻距离库之间速度差值超过 $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 或者, 相对风暴平均径向速度产品上, 方位上相邻距离库之间速度差值超过 $15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 可预警龙卷。6 次龙卷有 4 次发生在风暴单体迅猛发展的阶段, 风暴顶在 1 个体扫时间内迅速增高。风暴单体迅猛发展需要强上升气流配合, 强上升气流将低层辐合线上的小涡旋迅速拉伸, 使得旋转运动进一步发展, 诱发小尺度范围的强切变, 从而导致龙卷发生。

关键词: 龙卷风, 强切变, 单体顶高陡升

中图分类号: P458

文献标志码: A

doi: 10. 7519/j. issn. 1000-0526. 2014. 06. 003

Doppler Radar Product Features and Warning of Non-Supercell Tornadoic Storms

DIAO Xiuguang WAN Mingbo GAO Liuxi MENG Xiangu

Shandong Meteorological Observatory, Jinan 250031

Abstract: Six non-supercell tornadoic storms in Shandong Province were analyzed based on Doppler radar data from Jinan and Yantai in combination with environmental parameters and weather events, of which 4 tornado processes were produced in the condition of backward-tilting trough and one tornado process was produced in the condition of northwest flow, and moreover 2 tornadoes were in EF0 scale, 3 in EF1 scale, and one in EF2 scale. The results showed that the environment situations are conducive for thunderstorms on 31 July 2006, 18 July 2007 and 3 August 2009. High humidity in the lower level and the 0–1 km vertical wind shear $\geq 7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ play an important role in the occurrence of non-supercell tornadoes. The gate-to-gate azimuthal shear (i. e., the gate-to-gate velocity difference) $\geq 20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ in the 0.5° elevation angle mean radial velocity product, or the gate-to-gate azimuthal shear $\geq 15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ in the 0.5° elevation angle storm relative mean radial velocity product can be used as a warning criteria for non-supercell tornadoes. Four tornadoes form during the rapidly developing stages of thunderstorms, especially the cell tops markedly increase within 6 min. The strong updrafts that quickly build up within storms are the main incentives for the occurring of tornadoes. The rapid developing of storm needs strong updraft. The strong updrafts stretch the small-vortex existing in the low level convergence line quickly, thus, the small-vortex

* 国家自然科学基金项目(41375120)、山东省科技发展计划项目(2010GSF10805)和山东省气象局重点课题(2012sdqzx05)共同资助
2013 年 2 月 18 日收稿; 2013 年 9 月 4 日收修定稿
第一作者: 刁秀广, 主要从事强对流天气临近预报研究. Email: radardxg@126.com

movement gets further developed, inducing small-scale intense shear, and causing tornadoes to occur.

Key words: tornadoes, severe shear, abrupt rising of cell top

引言

龙卷风是一种伴随着猛烈旋转的漏斗状云柱的小尺度涡旋,直径一般从几十米到几百米,影响范围虽小,但破坏力极大(Bates, 1968; Fujita, 1971; Brown et al, 1978)。龙卷分为超级单体龙卷和非超级单体龙卷(Browning et al, 1976; Fujita et al, 1987)。超级单体龙卷由超级单体风暴产生,通常与中气旋相联系,在0~1 km风切变较大和抬升凝结高度较低的环境下持续的中气旋很容易诱发龙卷(Doswell et al, 1993; Craven et al, 2004)。非超级单体龙卷与非超级单体风暴相联系,通常与浅薄的、尺度较小的低层涡旋气流有关(Bruce et al, 1997)。非超级单体龙卷生命史可分为三个阶段(Wakimoto et al, 1989),一是生成阶段,小涡旋首先在云下方辐合边界的切变区得以发展,随着上升气流的发展,涡旋沿切变带移动;二是成熟阶段,小涡旋由上升气流拉伸时,旋转运动得到进一步发展;三是消亡阶段,降水形成下落,诱发涡旋内下沉气流,使得龙卷减弱。

根据风力及破坏程度, Fujita(1971)将龙卷风分为F0, F1, F2, ..., F5共6个等级。在F分级的基础上, Fujita等(1973)根据龙卷路径的宽度与长度又提出了Fujita-Pearson分级(FPP分级), FPP0, FPP1, FPP2, ..., FPP5共6个等级。2000—2004年,美国德州理工大学风科学与工程研究中心(WISE)以及有关气象专家和土木工程师共同对F分级进行了改进,2006年初美国国家气象局正式对外公布了改进后的F分级标准,即增强的F分级(EF分级)(Potter, 2007; Doswell et al, 2009)。EF分级共分为EF0, EF1, EF2, ..., EF5 6个等级,对应的风速范围分别为29.2~38.2、38.3~49.3、49.4~60.4、60.5~74.0、74.1~89.5和>98.5 m·s⁻¹。EF0~EF1为弱(weak)龙卷, EF2~EF3为强(strong)龙卷, EF4~EF5为烈(violent)龙卷。EF分级与F分级在破坏程度上基本是相同的,主要差别是对应的风速, EF分级更加科学化。

为了改进龙卷风的预警效果,美国强风暴实验室(NSSL)开发了基于多普勒天气雷达探测资料的

龙卷探测算法(Mitchell et al, 1989),并在WSR-88雷达业务中进行了应用,取得了良好效果。

我国气象工作者利用新一代天气雷达探测资料,对龙卷过程进行了分析研究,但大多是超级单体龙卷个例,非超级单体个例分析较少。诸多分析研究表明,典型的超级单体龙卷一般都发生在大的垂直风切变环境下,强烈的垂直不稳定、较低的抬升凝结高度、中高层强的垂直风切变都有利于强龙卷的发生(俞小鼎等, 2008; 陈永林, 2000; 郑媛媛等, 2009; 吴芳芳等 2012); 强龙卷一般都伴有强的中气旋,并且中气旋底部明显偏低,发生在距离雷达较近区域的强龙卷还能探测到龙卷涡旋特征(TVS)(刘娟等, 2009; 唐小新等, 2007; 金巍等, 2009; 赵瑞金等 2010); 强回波质心高度和垂直累积液态含水量的骤降、径向速度场中气旋性涡旋的迅速发展对龙卷的提前警戒有很好的参考指标,中气旋高度,最大切变高度的骤降,中气旋尺度的急剧收缩预示着龙卷的发生(李向红等, 2010; 林应等, 2011)。王毅等(2012)对安徽夏季槽前形势下龙卷和非龙卷型强对流天气的环境条件对比研究表明,龙卷类0~1 km强的垂直风切变大约是非龙卷类的3倍,同时低层风暴相对螺旋度存在明显差异。张晰莹等(2013)对2010年5月15日发生在黑龙江省西部地区的龙卷天气的卫星云图分析表明,雷暴云团在发展过程中不断生消与合并,龙卷发生在两个云团的交界处。非超级单体龙卷可以发生在各种利于对流风暴产生的环境下,对该类龙卷预警非常困难(马中元等, 2011; 周宏伟等, 2011)。

利用多普勒天气雷达资料,结合天气形势和环境物理量,对发生在山东的6次非超级单体龙卷风暴进行了分析,为今后类似天气过程临近预警提供参考。

1 天气形势与实况

1.1 龙卷实况

2006—2012年,经过核实发生在山东境内的非超级单体龙卷过程共有5次6个龙卷,其中2012年8月18日几乎在同一时间段内发生2个龙卷(见

表1)。

2006年7月31日16:10—16:20左右(北京时间,下同),济南市南部山区十六里河镇的义和、王家窝、郭家窝、郑家窝等4个村庄遭遇龙卷风袭击(简称20060731龙卷)。受灾的王家窝、郭家窝、郑家窝及义和4个村庄呈东西分布,义和村受灾最严重。经灾情调查,属于EF1级龙卷,龙卷影响范围大致是在 36.58°N 、 $117.11^{\circ}\sim 117.14^{\circ}\text{E}$,影响范围东西长度约2.8 km。龙卷发生地是丘陵地带,龙卷沿山沟向东移。

2007年7月18日15:30左右龙卷风袭击了烟台市栖霞市观里镇4个村庄(简称20070718龙卷)。受灾最严重的是观里镇大疃村,龙卷风自西向东穿过村子中央,给这个300多户的村庄造成了巨大的破坏,约有半数以上的房屋被损毁,数十名村民被倒塌的房屋或者龙卷风卷起的瓦片玻璃击伤,所幸未造成村民死亡。经灾后调查,属于EF1级龙卷。龙卷影响范围大致在 37.20°N 、 $120.68^{\circ}\text{E}\sim 37.22^{\circ}\text{N}$ 、 120.70°E ,影响范围约2.7 km。龙卷发生地北侧有海拔高度约200 m的山丘,龙卷向东偏北方向移动。

2008年7月5日17:20左右烟台龙口港5号码头遭遇龙卷风袭击(简称20080705龙卷)。位于5号码头东北方向2 km范围几十间民房和楼房遭遇龙卷风袭击,楼房玻璃和屋顶太阳能被掀起,平房

屋顶瓦片被掀起。经灾后调查,属于EF1级龙卷,龙卷影响范围大致在 37.67°N 、 $120.31^{\circ}\text{E}\sim 37.69^{\circ}\text{N}$ 、 120.32°E ,影响范围约2 km。龙卷发生地为海岸,东北方向移动。

2009年8月3日16:05时许,位于烟台栖霞市境内的庵里水库湖面上,忽然腾起一条参天水柱,在湖面上缓慢移动,上岸后造成岸边树木折断,损失较轻(简称20090803龙卷)。影响地点大致是 37.34°N 、 120.83°E ,影响范围约1 km,龙卷地北侧有海拔高度约200 m的山丘。根据灾情调查分析,属于EF0级龙卷。

2012年8月18日下午18:50—19:20左右在泰安市宁阳县产生龙卷风(简称20120818宁阳龙卷)。灾后调查表明,受灾最严重的是周家临邑村、石桥村、西关村和石碣集村,直径30~40 cm的大树被拦腰折断,属于EF2级龙卷。龙卷发生在平原地区,基本向东略偏北方向移动。根据实地调查,龙卷第一次及地产生破坏起始于 35.78°N 、 116.78°E ,之后又有3次及地,每及地一次都产生严重破坏,最后终止于 35.80°N 、 116.88°E ,影响范围约12 km。同日18:40左右,济南东部章丘市白泉村遭遇龙卷袭击(简称20120818章丘龙卷)。龙卷风自西向东穿过村子,树木被刮倒,村东玉米呈气旋性旋转倒伏。经灾情调查,龙卷发生在 36.66°N 、 117.52°E ,影响范围约500 m,属于EF0级龙卷。

表1 6次龙卷等级统计

Table 1 The intensity scale of 6 tornadoes

龙卷出现时间	经纬度	影响路径长度/km	EF分级	出现地点
20060731—16:10	36.58°N 、 $117.11^{\circ}\text{E}\sim 36.58^{\circ}\text{N}$ 、 117.14°E	2.8	EF1	济南十六里河镇王家窝、义和等村
20070718—15:30	37.20°N 、 $120.68^{\circ}\text{E}\sim 37.22^{\circ}\text{N}$ 、 120.70°E	2.7	EF1	烟台栖霞市观里镇大疃村等
20080705—17:20	37.67°N 、 $120.31^{\circ}\text{E}\sim 37.69^{\circ}\text{N}$ 、 120.32°E	2	EF1	烟台龙口市龙口港
20090808—16:05	37.34°N 、 120.83°E	1	EF0	烟台栖霞市庵里水库
20120818—18:50	35.78°N 、 $116.78^{\circ}\text{E}\sim 35.80^{\circ}\text{N}$ 、 116.88°E	12	EF2	泰安宁阳县周家临邑、西关等村庄
20120818—18:40	36.66°N 、 117.52°E	0.5	EF0	济南章丘市白泉村

1.2 物理量分析

表2是5次龙卷过程中上午08:00探空资料计算的物理量,主要包括500和925 hPa比湿、K指数、SI指数、850与500 hPa温差、对流有效位能(CAPE)、抬升凝结高度(LCL)和0~1 km垂直风切变。表3是订正到午后14:00的物理量,使用上海市气象台开发的探空订正软件,利用14:00地面

气温和露点进行探空订正,主要是计算CAPE和LCL。表3中最后一列0~1 km风切变是龙卷产生地最近气象站14:00地面风与对应时次多普勒天气雷达VWP产品1 km高度风进行的计算。例如,2006年7月31日14时济南地面观测风速 $6\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,风向约 200° ,济南天气雷达VWP产品1 km高度风速 $12\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,风向 230° ,0~1 km风切变约为 $6.7\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

可以看出,5次龙卷过程中低层比湿较大,地面气温较高,表明低层暖湿;中层比湿相对较小,表明中层较为干燥;850与500 hPa温差较小,不利于雹暴的产生。 LCL 高度14:00与08:00相比明显增高,在700~1400 m之间,平均1050 m。 $CAPE$ 午后有明显改善,20120818宁阳龙卷风暴环境 $CAPE$ 达到 $4465 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。午后0~1 km垂直风切变也明

显增大,基本在 $7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上,20070718龙卷和20080705龙卷午后0~1 km垂直风切变达到 $15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 左右。EF2级龙卷与其他几次龙卷相对比,当日08时探空资料导出的环境参数没有明显差异,而14时露点温度最高,相应的订正后的 $CAPE$ 明显大于其他几次。

表 2 环境物理量

Table 2 Environmental parameters

时间	探空 站点	925 hPa 比湿 / $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	500 hPa 比湿 / $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	K/C	SI/C	850与500 hPa 温差 $\Delta T/\text{C}$	$CAPE$ / $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$	抬升凝结 高度/m	0~1 km 风切 变/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
20060731-08:00	章丘	16.9	0.06	39	-2.1	27	1220	900	7.9
20070718-08:00	成山头	19.1	0.25	17	-1.1	23	0	10	5.0
20080705-08:00	成山头	16.9	5.46	37	0.7	21	0	10	8.3
20090803-08:00	成山头	12.3	1.28	29	4.7	23	970	300	3.8
20120818-08:00	章丘	16.9	2.05	33	-2.3	24	610	100	4.8

表 3 订正后环境物理量

Table 3 Revised environmental parameters

时间(地点)	地面		$CAPE$ / $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$	抬升凝结 高度/m	0~1 km 风切 变/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	龙卷等级
	露点/ C	气温/ C				
20060731-14:00(济南)	24	33	2030	1300	6.7	EF1
20070718-14:00(栖霞)	26	31	2570	700	15.6	EF1
20080705-14:00(龙口)	24	33	757	1300	14.7	EF1
20090803-14:00(栖霞)	19	30	860	1400	7.1	EF0
20120818-14:00(宁阳)	27	32	4465	800	7.0	EF2
20120818-14:00(章丘)	22	27	250	800	6.7	EF0

1.3 天气形势分析

图1是5次龙卷过程当日08:00天气形势中尺度分析图。2006年7月31日08:00山东处于850 hPa切变线前侧,受副热带高压边缘暖湿气流控制,低层850 hPa比湿山东北部地区 $\geq 15 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,850 hPa急流在山东北部形成辐合。2007年7月18日08:00山东处于500和850 hPa槽前西南气流区,低层850 hPa比湿 $\geq 15 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,850 hPa急流在山东半岛北部形成辐合。2008年7月5日08:00山东处于500和850 hPa槽前西南气流区,低层850 hPa比湿在 $12 \sim 14 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,850 hPa急流在山东半岛北部形成辐合。2009年8月3日08:00山东处在500 hPa槽后,850 hPa为偏东气流,上空受冷空气控制,低层850 hPa比湿 $< 10 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。2012年8月18日08:00山东处于500和850 hPa槽前西南气流区,低层850 hPa比湿在 $12 \sim 14 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$

之间,850 hPa没有急流。

5次龙卷过程中有4次是后倾槽形势并且出现在槽前西南暖湿气流区,20090803龙卷出现在500 hPa槽后西北气流控制下的冷区里,但地面上存在高温区域(图略)。

2 雷达回波演变特征分析

2.1 反射率因子

图2给出了6个非超级单体龙卷风暴组合反射率因子和风暴演变趋势图。20060731龙卷风暴产生在带状回波中,降雨带偏东方向缓慢移动,而单体东偏北方向移动(图2a₁);该风暴生成于15:31前后,发展前期反射率因子、单体顶高和强中心高度变化不大,最大反射率因子在 $55 \sim 57 \text{ dBz}$,单体顶高基本在 $6 \sim 8 \text{ km}$,强中心高度基本在 6 km 左右;

16:09 风暴突然间猛烈发展,强中心高度迅速上升到 9.1 km,单体顶高迅速上升到 12.1 km,但反射率因子变化不明显,之后强中心高度迅速下降(图 2a₂);龙卷产生在单体迅猛发展阶段。

20070718 龙卷风暴产生在冷锋带状回波前方,单体在冷锋前方东北方向移动(图 2b₁);该风暴生成于 16:50 前后,发展前期反射率因子逐渐增强,由 47 dBz 增大到 58 dBz,强中心高度逐渐上升,单体顶高变化不大,基本在 9 km 左右;17:12 风暴突然间猛烈发展,强中心高度迅速由 6.4 km 上升到 8.2 km,单体顶高迅速由 9.0 km 上升到 13.2 km,但反射率因子变化不大,之后强中心高度迅速下降(图 2b₂),单体顶高逐渐降低;单体迅猛发展约 18 min 之后产生了龙卷。

20080705 龙卷风暴产生在带状回波下端,单体东北方向移动(图 2c₁);该风暴生成于 15:40 前后,消散于 17:50 左右,历时较长。16:35—17:12 单体顶高逐渐降低,由 10 km 高度下降到 4.8 km,强中心高度基本在 4 km 以下,反射率因子变化不大,基本在 55~57 dBz 之间;17:19 风暴又有所发展,单体顶高由 4.8 km 发展到 6 km,强中心也上升到 3 km 高度(图 2c₂);17:20 龙卷产生。

200900803 龙卷风暴产生在带状回波右端,单体西偏南方向移动,移动速度较为缓慢(图 2d₁);该风暴生成于 15:30 前后,发展前期反射率因子变化不大,基本在 53 dBz 左右,强中心高度呈逐渐上升趋势,单体顶高变化不大,基本在 4 km 左右;17:54 风暴突然间猛烈发展,强中心高度迅速由 3 km 上升到 5.8 km,单体顶高迅速由 3.8 km 上升到 5.8 km,反射率因子由 53 dBz 迅速增强到 60 dBz;之后强中心高度迅速下降(图 2d₂),单体顶高基本维持不变,反射率因子在 58 dBz 左右;单体迅猛发展约 5 min 之后产生了龙卷。

20120818 宁阳龙卷风暴产生在带状降雨回波下端,单体东偏北方向移动(图 2e₁);该风暴生成于 18:00,之后风暴顶高度迅速增高,由 4.5 km 上升到 10 km 高度,强中心高度也同时上升,但反射率因子变化不大;18:22 风暴又一次迅速发展,单体顶高由 9 km 迅速上升到 12.4 km,18:53 强中心高度由 2.0 km 上升到 5.8 km,但反射率因子变化不大(图 2e₂);18:50 左右龙卷产生。

20120818 章丘龙卷产生在弓形回波的右端(图 2e₁),18:12 左右,降雨带状回波的顶端演变成弓形回波,约 28 min 后,弓形回波的右端产生 EF0 级龙卷。

从龙卷风暴反射率因子演变特征来看,6 个龙卷均产生在降雨回波带之中,但龙卷风暴所在带状回波中的部位和风暴强度、形状不尽相同,因此,从反射率因子特征角度预报龙卷难度非常大。从风暴发展趋势来看,单体迅猛发展,特别是风暴顶部迅速增高,对非超级单体龙卷的产生有一定指示意义。

2.2 速度产品

速度产品包括平均径向速度产品(V)和相对风暴的平均径向速度产品(SRM)等。SRM 产品用来探测被风暴运动掩盖掉的切变区域如中气旋、辐散及龙卷涡旋特征,对快速移动的风暴最为有效。

图 3 给出了 6 个非超级单体龙卷风暴速度产品。图 3a₁ 和 3a₂ 分别是 2006 年 7 月 31 日 15:50 和 16:02 济南雷达 0.5°仰角 V26 产品,图 3b₁ 和 3b₂ 分别是 2007 年 7 月 18 日 15:12 和 15:25 烟台雷达 0.5°仰角 V26 产品,图 3c₁ 和 3c₂ 分别是 2008 年 7 月 5 日 16:54 和 17:12 烟台雷达 0.5°仰角 SRM56 产品,图 3d₁ 和 3d₂ 分别是 2009 年 8 月 3 日 15:12 和 16:13 烟台雷达 0.5°仰角 V26 产品,图 3e₁ 和 3e₂ 分别是 2012 年 8 月 18 日 18:12 和 18:30 济南雷达 0.5°仰角 V27 产品,图 3f₁ 和 3f₂ 分别是 2012 年 8 月 18 日 18:18 和 18:42 济南雷达 0.5°仰角 V26 产品。

2006 年 7 月 31 日 15:30 前后,济南雷达 0.5°仰角径向速度产品在济南南部山区出现西南—东北向辐合线,15:50 前后出现明显气旋性辐合(图 3a₁),16:02 出现龙卷涡旋特征(TVS),龙卷涡旋特征符号处相邻距离库最大径向速度值在 15~19 m·s⁻¹之间,最小径向速度值在 -14~-10 m·s⁻¹之间,存在较大的切变(图 3a₂)。之后 16:09—16:15 连续 2 个体扫一直有 TVS,其特征见表 4,AVGDV 表示径向速度差的平均值,LLDV 表示最低仰角径向速度差,MXDV 表示最大径向速度差,DEPTH 表示 3D 环流特征的厚度,BASE 和 TOP 分别表示 3D 环流特征的底部和顶部高度,MXSHR 表示 3D 环流特征中最大切变量,HGT 表示高度。

可以看出,20060731 龙卷 3D 涡旋底部径向速度差值都在 $25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上,16:09 最大为 $32 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$;最大速度差为 $41 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,出现在 16:09,此时最大切变为 $60 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$;3D 环流较为深厚,16:02—16:09 厚度在 6 km 以上。TVS 出现约 8 min 后,即 16:10 左右地面出现龙卷,龙卷发生在底部径向速度差和最大径向速度差最大时间段。

2007 年 7 月 18 日烟台雷达 V26 产品显示,15:12 低层径向速度图上, 244° 、82 km 处出现明显的气旋性辐合环流(之前没有这种现象),15:25 辐合现象更加明显,并且同一距离圈上相邻距离库之间出现强的切变,正的最大径向速度值在 $5 \sim 9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 之间,负的最小径向速度在 $-19 \sim -15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 之间,速度差在 $20 \sim 28 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 之间。15:31—16:05 之间切变依然存在,但距离库之间的速度差均小于 $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (图略)。这种气旋性环流仅存在于 0.5° 仰角,期间没有 TVS 出现。烟台雷达海拔高度为 411.4 m,龙卷地点距离雷达站约 70 km,最低探测高度约 1.4 km,此高度以下的环流无法探测到。该次龙卷涡旋环流较为浅薄,在雷达 1.5° 仰角速度产品上没有反映。低层平均径向速度图像上,同一距离圈上相邻距离库之间出现强切变约 5 min

后地面出现龙卷。

2008 年 7 月 5 日烟台雷达低层平均径向速度图上龙卷风暴所在区域为一致的负速度区,没有正负速度之间的辐合区或气旋性旋转区(图略)。16:48 SRM56 产品出现气旋性环流(图略),16:54 更为明显(图 3c₁),并且同一距离圈上相邻距离库之间出现强的切变,正的最大径向速度值在 $10 \sim 14 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 之间,负的最小径向速度在 $-9 \sim -5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 之间,相对风暴的速度差在 $15 \sim 23 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 之间,这种切变一直持续到 17:12(图 3c₂)。17:19 之后环流明显减弱(图略)。但距离库之间的速度差均小于 $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。这种气旋性环流仅存在于 0.5° 仰角,期间没有 TVS 出现。龙卷地点距离雷达站约 100 km,烟台雷达最低探测高度约 2 km,此高度以下的环流无法探测到。该次过程中风暴移动方向和移动速度没有明显变化,而且移动较快,平均移动方位约 225° ,移动速度约 $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。快速移动的风暴往往会掩盖掉尺度较小的切变,而 SRM 产品通过减去风暴移动速度可以很好地探测到相对于风暴的切变。低层相对风暴平均径向速度图像上,同一距离圈上相邻距离库之间出现强切变约 26 min 后地面出现龙卷。

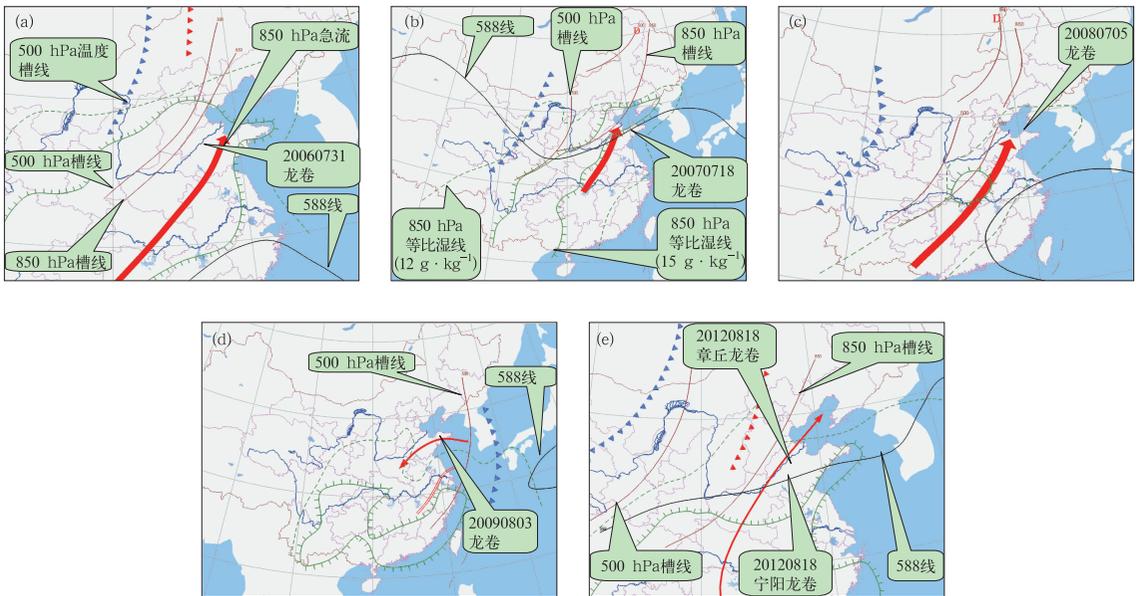


图 1 中尺度分析

(a)2006 年 7 月 31 日 08:00, (b) 2007 年 7 月 18 日 08:00, (c) 2008 年 7 月 5 日 08:00,
(d) 2009 年 8 月 3 日 08:00, (e) 2012 年 8 月 18 日 08:00

Fig. 1 Mesoscale analysis at 08:00 BT

(a) 31 July 2006, (b) 18 July 2007, (c) 5 July 2008, (d) 3 August 2009, (e) 18 August 2012

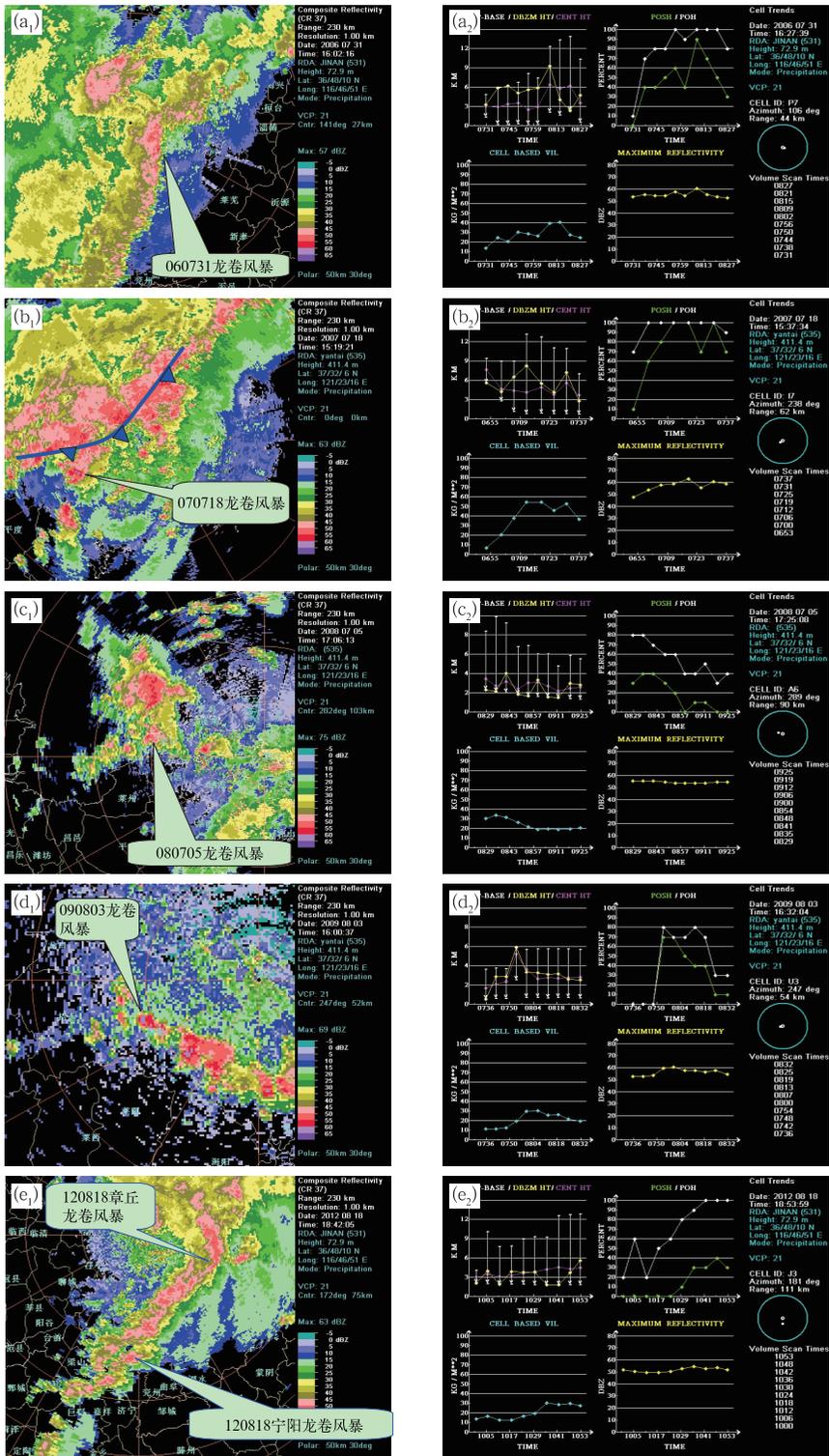


图 2 组合反射率因子(CR)和风暴趋势

(a)2006 年 7 月 31 日(a₁)16:02,CR37,(a₂)15:31—16:27 风暴趋势;(b)2007 年 7 月 18 日(b₁)15:19,CR37,(b₂)14:53—15:37 风暴趋势;(c)2008 年 7 月 5 日(c₁)17:06,CR37,(c₂)16:29—17:25 风暴趋势;(d)2009 年 8 月 3 日(d₁)16:00,CR37,(d₂)15:36—16:32 风暴趋势;(e)2012 年 8 月 18 日(e₁)18:42,CR37,(e₂)18:00—18:53 风暴趋势

Fig. 2 Composite reflectivity (CR) and cell trends

(a₁) 16:02 BT CR37, (a₂) 15:31—16:27 BT cell trends on 31 July 2006; (b₁) 15:19 BT CR37, (b₂) 14:53—15:37 BT cell trends on 18 July 2007; (c₁) 17:06 BT CR37, (c₂) 16:29—17:25 BT cell trends on 5 July 2008; (d₁) 16:00 BT CR37, (d₂) 15:36—16:32 BT cell trends on 3 August 2009; (e₁) 18:42 BT CR37, (e₂) 18:00—18:53 BT cell trends on 18 August 2012

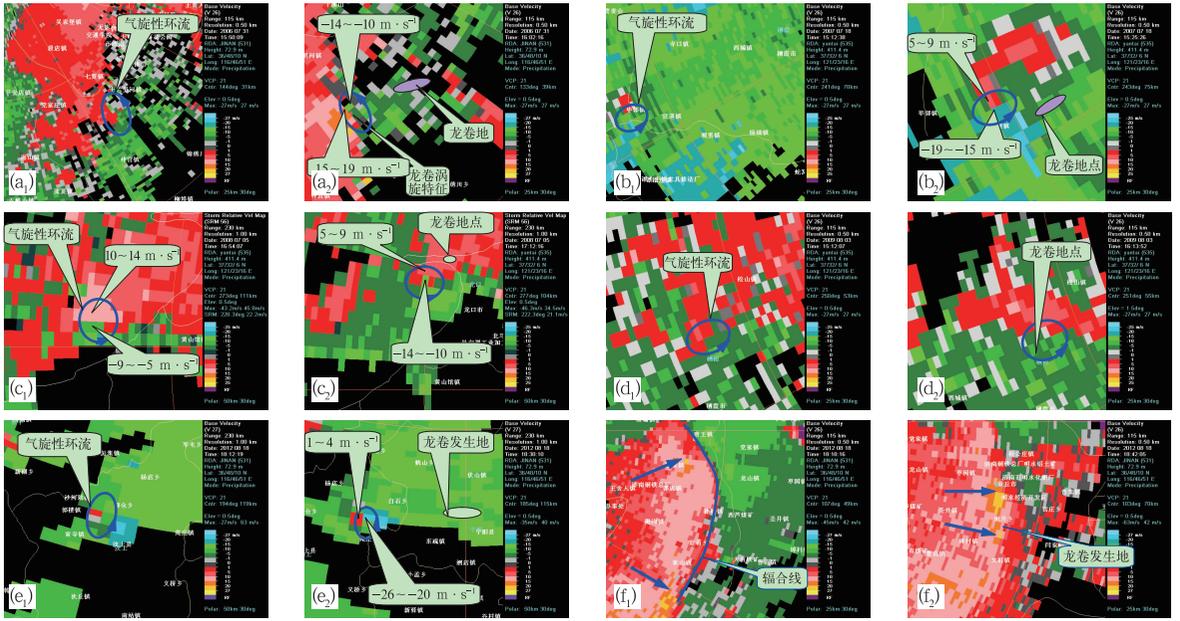


图 3 0.5°仰角速度产品

(a₁, a₂)2006 年 7 月 31 日 15:50、16:02 V26, (b₁, b₂) 2007 年 7 月 18 日 15:12、15:25 V26,
 (c₁, c₂) 2008 年 7 月 5 日 16:54、17:12 SRM56, (d₁, d₂) 2009 年 8 月 3 日 15:12、16:13 V26,
 (e₁, e₂) 2012 年 8 月 18 日 18:12、18:30 V27, (f₁, f₂) 2012 年 8 月 18 日 18:18、18:42 V26

Fig. 3 Velocity products on elevation 0.5°

(a₁, a₂)15:50,16:02 BT V26 on 31 July 2006, (b₁, b₂)15:12,15:25 BT V26 on 18 July 2007,
 (c₁, c₂)16:54,17:12 BT SRM56 on 5 July 2008, (d₁, d₂)15:12,16:13 BT V26 on 3 August 2009,
 (e₁, e₂)18:12,18:30 BT V27 on 18 August 2009, (f₁, f₂)18:18,18:42 BT V26 on 18 August 2012

表 4 2006 年 7 月 31 日龙卷涡旋特征参数

Table 4 The parameters of tornadic vortex signature(TVS)

时间	AVGDV /m · s ⁻¹	LLDV /m · s ⁻¹	MXDV/HGT /(m · s ⁻¹ /km)	DEPTH /km	BASE/TOP /km	MXSHR/HGT /(10 ⁻³ s ⁻¹ /km)
16:02	18	28	28/0.5	6.4	0.5/6.9	45/0.5
16:09	23	32	41/2.0	7.0	0.5/7.5	60/2.0
16:15	14	27	27/0.5	3.1	0.5/3.6	40/0.5

2009 年 8 月 3 日 14:30 左右,烟台雷达径向速度图上出现基本呈东西向分布的明显的辐合线,辐合线南侧为负速度区,北侧为正速度区(图略)。15:12 低层径向速度图上,龙卷发生地附近出现明显的气旋性辐合环流(图 3d₁),并一直维持。龙卷发生前后,气旋性辐合环流并没有明显变化(图 3d₂),方位上相邻距离库之间的速度差 < 15 m · s⁻¹。这种气旋性环流存在于 0.5°~2.4°仰角,基本在 2.8 km 之下,期间既没有出现中气旋,也没有龙卷涡旋特征出现(图略)。SRM 产品与 V26 产品比较,径向速度没有明显变化。龙卷地点距离雷达站约 54 km,最低探测高度约 1.1 km,此高度以下的环流无法探测到。该次龙卷尺度较小,目击者称直

径约十几米,小尺度环流较为浅薄,在雷达径向速度图上没有出现强切变。该次龙卷在平均径向速度和相对风暴径向速度产品上没有典型特征。

2012 年 8 月 18 日 18:12 济南雷达 0.5°仰角 V27 产品上宁阳龙卷单体低层出现明显的气旋性环流,正的径向速度中心在 1~4 m · s⁻¹之间,负的径向速度中心在 -26~-20 m · s⁻¹之间(图 3e₁),两者之间的距离约 4 km,切变在 5.2 × 10⁻³~7.5 × 10⁻³ s⁻¹之间。18:18 和 18:24 两个体扫期间正的径向速度消失,但负的最小径向速度仍在 -26~-20 m · s⁻¹之间,相对于风暴而言仍然存在气旋性环流。18:30—19:29 近 1 h 时间低层径向速度产品上相邻距离库(方位上相邻)之间一直存在小尺度

气旋性涡旋。18:30 涡旋中心相邻距离库(方位上相邻)中正的径向速度在 $1\sim 4\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 之间,负的径向速度在 $-26\sim -20\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 之间,速度差在 $21\sim 30\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 之间(图 3e₂)。18:36—18:53 速度差有所减小(图略)。18:59 速度差增大,速度差在 $25\sim 35\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 之间,涡旋强度增强(图略)。之后到 19:23,速度差基本在 $20\sim 30\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 之间(图略)。19:29 速度差迅速减小,涡旋强度明显减弱,19:35 涡旋环流消失。气旋性涡旋环流仅存在于 0.5° 仰角径向速度产品,对应的高度约 1.8 km ,由于距离相对较远, 1.8 km 以下高度无法探测到。低层平均径向速度图像上,同一距离圈上相邻距离库之间出现强切变约 20 min 后地面出现龙卷。

20120818 章丘龙卷由弓形回波产生,18:18 济南雷达 V26 产品显示,回波主体前侧为弓形辐合线,后侧径向速度局部出现 $20\sim 26\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 大值区(图 3f₁);18:42 V26 产品显示,在龙卷发生地附近没有正负速度间的切变(图 3f₂),但有大的径向速度,相对风暴而言,存在气旋性旋转气流。18:59 弓形回波结构依然存在,对应径向速度上仍然存在大的径向速度,19:05 弓形结构基本消失(图略)。SRM 产品上龙卷单体低层没有出现明显的方位上相邻距离库之间的强切变。降雨回波带中弓形回波出现约 24 min 后,地面出现龙卷。

两次 EF0 龙卷在雷达径向速度和相对风暴径向速度产品上均没有明显的小尺度涡旋特征,EF1 和 EF2 龙卷在雷达径向速度图或相对风暴径向速度产品上均有显著的小尺度涡旋特征,但涡旋中心相邻距离库之间的速度差没有明显差别,通过缩小速度产品数据等级之间的差值进行资料重新回放后,也没有发现明显差异。

3 结 语

(1) 6 次非超级单体龙卷都是在有利于对流的天气形势下发生的, K 指数、 SI 、 $CAPE$ 等环境参数差异较大,因此从天气形势和环境物理量参数很难判别是否会有龙卷产生。低层大的湿度,低层特别是 $0\sim 1\text{ km}$ 高度存在明显的垂直风切变,是非超级单体龙卷发生的有利环境条件。

(2) 6 次龙卷均产生在降雨回波带之中,都没有冰雹出现,但龙卷风暴所在带状回波中的部位和风暴强度、形状不尽相同,因此,从反射率因子特征

角度预报龙卷难度非常大。从风暴发展趋势来看,单体迅猛发展,特别是风暴顶部迅速增高,对非超级单体龙卷的预警有一定指示意义。降雨回波带中的某段出现弓形回波结构,有可能会激发龙卷天气。

(3) 低层径向速度出现强切变对 EF1 和 EF2 级非超级单体龙卷的预警有一定指示意义。平均径向速度图上,同一距离圈上相邻距离库之间出现强切变(速度差值超过 $20\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$),或者,相对风暴平均径向速度图上,同一距离圈上相邻距离库之间出现强切变(速度差值超过 $15\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$),对 EF1 和 EF2 级龙卷预警具有 $5\sim 26\text{ min}$ 不等的时间提前量。对 EF0 级龙卷几乎不可预警。

(4) 上升气流的迅速加强可将低层辐合线上的小涡旋迅速拉伸,使得旋转运动进一步发展,从而诱发龙卷。6 个龙卷风暴有 5 个是发生在风暴发展特别是风暴顶迅速上升阶段,风暴单体的迅速发展,需要强的上升气流配合,上升气流将低层辐合线上的小涡旋迅速拉伸,使得旋转运动进一步发展,诱发小尺度范围的强切变,从而导致龙卷发生。

参考文献

- 陈永林. 2000. 上海一次龙卷风过程分析. 气象, 26(9):19-23.
- 金巍, 曲岩, 安来友. 2009. 超级单体引发的龙卷天气过程分析. 气象, 35(3):36-41.
- 李向红, 唐熠, 郑传新, 等. 2010. 一次多种强对流天气过程的雷达回波特征分析. 气象, 36(8):61-71.
- 林应, 陈铁, 张树民, 等. 2011. 海门一次 F1 级龙卷的多普勒天气雷达特征分析. 气象科学, 31(增刊):126-133.
- 刘娟, 朱君鉴, 魏德斌, 等. 2009. 070703 天长超级单体龙卷的多普勒雷达典型特征. 气象, 35(10):32-39.
- 马中元, 叶小峰, 张瑛, 等. 2011. 江西三类致灾大风天气活动与回波特征分析. 气象, 37(9):1108-1117.
- 唐小新, 廖玉芳. 2007. 湖南省永州市 2006 年 4 月 10 日龙卷分析. 气象, 33(8):23-38.
- 王毅, 郑媛媛, 张晓美, 等. 2012. 夏季安徽槽前形势下龙卷和非龙卷型强对流天气的环境条件对比研究. 气象, 38(12):1473-1481.
- 吴芳芳, 俞小鼎, 张志刚, 等. 2012. 对流风暴内中气旋特征与强烈天气. 气象, 38(11):1330-1338.
- 俞小鼎, 郑媛媛, 廖玉芳, 等. 2008. 一次伴随强烈龙卷的强降水超级单体风暴研究. 大气科学, 32(3):508-522.
- 张晰莹, 吴迎旭, 张礼宝. 2013. 利用卫星、雷达资料分析龙卷发生的环境条件. 气象, 39(6):728-737.
- 赵瑞金, 郝雪明, 杨向东, 等. 2010. 2009 年 7 月 20 日承德龙卷多普勒天气雷达特征. 气象, 36(11):68-76.
- 郑媛媛, 朱红芳, 方翔, 等. 2009. 强龙卷超级单体风暴特征分析与预警研究. 高原气象, 28(3):617-625.
- 周宏伟, 王群, 夏文梅, 等. 2011. 盐城一次龙卷、短时强降水的地面

- 中尺度分析和雷达回波特征. 大气科学学报, 34(6):763-768.
- Bates F C. 1968. A theory and model of the tornado. Preprints, Int Conf on Cloud Physics, Toronto, Amer Meteor Soc, 559-563.
- Brown R A, Lemon L R, Burgess D W. 1978. Tornado detection by pulsed Doppler radar. *Mon Wea Rev*, 106:29-38.
- Browning K A, Foote G B. 1976. Airflow and hail growth in supercell storms and some implication for hail suppression. *Quart J R Met Soc*, 102:499-533.
- Bruce D L, Robert B W. 1997. The numerical simulation of non-supercell tornadogenesis. Part I: initiation and evolution of pre-tornadic mesocyclone circulations along a dry out flow boundary. *J Atmos Sci*, 54:32-60.
- Craven J P, Brooks H E. 2004. Baseline climatology of sounding derived parameters associated with deep, moist convection. *Nat Wea Digest*, 28:13-24.
- Doswell C A, Brooks H E, Dotzek N. 2009. On the implementation of the Enhanced Fujita scale in the USA. *Atmos Res*, 93:554-563.
- Doswell C A III, Burgess D W. 1993. Tornadoes and tornadic storms: A review of conceptual models. *The Tornado: Its Structure, Dynamics, Prediction and Hazards*. Geophysical Monograph 79, Amer Geophys Union, 161-172.
- Fujita T T. 1971. Proposed characterization of tornadoes and hurricanes by area and intensity. SMRP Res Paper No. 91, University of Chicago, 42.
- Fujita T T, Pearson A D. 1973. Results of FPP classification of 1971 and 1972 tornadoes. Preprints, 8th Conf on Severe Local Storms, Denver, CO, Amer Meteor Soc, 142-145.
- Fujita T T, Theodore U S. 1987. Tornadoes Part 1: 70-Year Statistics. Satellite and Mesometeorology Research Project (SMRP) Research Paper Number 218, University of Chicago, 122.
- Mitchell E D, Vasiloff S V, Stumpf G J, et al. 1998. The National Severe Storms Laboratory tornado detection algorithm. *Wea Forecasting*, 13:352-366.
- Potter S. 2007. Fine-tuning Fujita. *Weatherwise*, 60:64-71.
- Wakimoto R M, Wilson J W. 1989. Non-supercell tornadoes. *Mon Wea Rev*, 117:1113-1140.