

文章编号: 2096-1618(2020)01-0036-07

基于蓝金模式下的中气旋与龙卷雷达回波模拟

洁拉曲铁, 王海江, 高梦青, 何姣阳
(成都信息工程大学电子信息工程学院, 四川 成都 610225)

摘要:中气旋是强对流灾害性天气发生的特征,其形成过程分为生成阶段、成熟阶段和消亡阶段,处于成熟阶段的中气旋在4个不同高度层上具有不同的速度特征。强烈的中气旋或扩展到地面附近的中等以上强度的中气旋产生龙卷的概率约为40%。绝大多数龙卷发生于中气旋核区内,但并不是所有的中气旋都能发展成龙卷。多普勒天气雷达是探测中气旋与龙卷的射频传感器,但可用的中气旋与龙卷的回波数据有限,对中气旋与龙卷展开数值模拟是一种可供选择的方法。本文首先利用蓝金模式模拟出中气旋的风场和中气旋核区内发生龙卷时的风场。然后使用多普勒雷达对该风场进行探测,生成中气旋与龙卷回波数据,并显示出多普勒雷达径向速度图。生成的回波数据可用于中气旋与龙卷识别算法的验证。

关键词:中气旋;龙卷;蓝金模式;回波数据

中图分类号:TN959.4

文献标志码:A

doi:10.16836/j.cnki.jcuit.2020.01.007

0 引言

对流云灾害性天气是人类不得不面对的一个重要问题,其中龙卷气旋是最严重的天气灾害之一。近些年,中国多地发生龙卷气旋灾害,造成大量的人员伤害以及巨大的经济损失,成为社会关注点。例如,2019年7月3日辽宁开原市遭受龙卷风的袭击,造成6人死亡,受伤人数高达190余人,多处住房建筑受损严重,除此之外,7座电塔倒塌,6.5万户电力用户受到影响。中气旋是出现强对流云灾害性天气的标志,一旦中气旋发生,90%会出现强烈天气(灾害性大风、暴雨、冰雹等),其中20%的概率会出现龙卷;而强烈的中气旋或扩展到低层地面附近的中等以上强度的中气旋会发生龙卷的概率达到40%^[1-4]。典型龙卷一般发生于已存在的中尺度气旋核半径内,具有强度剧烈、破坏性强等特点^[5]。

对于龙卷的认识,需要了解其形成原因、重要运动参数和气流旋转速度分布。俞小鼎^[6]发现发生在安徽的一次龙卷中存在强中气旋,强的上升气流以及垂直风切变是产生龙卷的有利环境。衡量中气旋以及龙卷大小的关键参数是核半径和该处的最大旋转速度(峰值速度)^[7]。中气旋气流速度分布可以利用蓝金模式^[8]来近似,该模式对龙卷的气流速度分布也是一级近似^[9]。Burgess^[10]指出,在俄克拉荷马发生的强雷暴中的中气

旋核区直径一般是5~6 km,气流旋转速度的最大值在20~25 m/s。而龙卷的气流旋转速度比中气旋大得多,最强的龙卷在地面上产生的风速在110~200 m/s,且其水平尺度较小,直径一般从几十米到几百米,龙卷一般分为超级单体龙卷和非超级单体龙卷^[11-13]。

多普勒天气雷达是探测灾害性天气的重要手段,其探测到中气旋与龙卷天气时,多普勒速度图上能明显地观察到两者的特征标志,能达到识别中气旋与龙卷天气的效果,并对其发出提前预警预报,减少灾害程度。但中气旋与龙卷发生时并不是每次都能被多普勒雷达探测到,所以典型的中气旋与龙卷多普勒雷达回波数据有限。因此对中气旋与龙卷展开数值模拟,并生成多普勒雷达回波数据是一种解决途径。以此为龙卷气旋的识别与预警提供使用价值。在对中气旋与龙卷数值模拟上,Tripoli^[14]对中气旋的风场进行了模拟,Wicker^[15]对龙卷漩涡的云团进行了三维重建,但都未用多普勒雷达进行探测,生成回波数据。

利用中气旋与龙卷的关键运动参数,首先以蓝金模式对中气旋与龙卷进行模拟,构建出其风场结构。然后,结合多普勒雷达的探测原理,以构建出的模型中气旋与龙卷作为雷达探测目标,使用多普勒雷达对其进行探测,即把中气旋以及龙卷数据映射到雷达径向上,生成中气旋与龙卷的多普勒雷达回波数据,并以平面位置显示(PPI)方式对多普勒速度进行显示。这对需要在多普勒速度图上识别出中气旋与龙卷特征标志的气象工作者具有参考作用。此外,生成的多普勒雷达回波数据可用于中气旋与龙卷识别算法的验证。

收稿日期:2019-03-28

基金项目:国家自然科学基金资助项目(U1733103);四川省科技厅资助项目(2018JZ0030)

1 中尺度气旋和龙卷

1.1 蓝金模式

大量雷达观测资料和研究结果表明,中小尺度气旋的气流速度场实际上由围绕其中心旋转的气旋性环流风场,其气流旋转速度分布常利用垂直轴对称的气旋环流模型——蓝金模式来模拟,图 1 是蓝金模式下气旋旋转速度分布关系示意图。

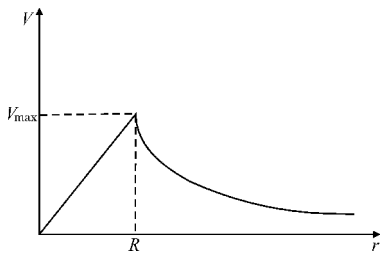


图 1 气旋速度分布

纵坐标表示气旋速度,横坐标为距离半径。由图 1 可见,在零速度中心到距离 R 内,气旋速度随着距离的增加线性增加;而在距离 R 以外,气旋速度与距离成反比,即

$$V = C_1 \times r \quad (r \leq R) \tag{1}$$

$$V = C_2 / r \quad (r > R) \tag{2}$$

其中 C_1 与 C_2 是常量。变量 r 表示离旋转核心的距离, R 称为气旋的核半径,中气旋的尺度是由 R 的大小来度量的,描述气旋旋转的重要参数是核半径以及在该处的最大旋转速度(峰值速度)。在距离 R 处,气旋旋转速度达到最大值,即达到峰值速度 V_{\max} ,因此

$$C_1 = V_{\max} / R \tag{3}$$

$$C_2 = R \times V_{\max} \tag{4}$$

在旋转核心区内,速度分布可以想象成一个具有垂直剖面是圆面的圆柱体。蓝金模式对中气旋、台风甚至是龙卷都是很好的一级近似。对于与蓝金模式相似的中气旋或龙卷,其重要的运动参数是核半径 R 以及该距离处的最大旋转速度。多普勒天气雷达以锥形扫面方式对中尺度气旋探测时,在多普勒速度 PPI 图上能推算出核半径和峰值速度。

1.2 中尺度气旋

中尺度气旋形成原因是中层垂直风的切变,使气流开始旋转,并向地面和向上增长。目前成熟的理论认为,一个完整的中气旋具体可分为 3 个阶段,分别是生成阶段、成熟阶段与消亡阶段,其 3 个阶段讨论如下。

(1)生成阶段:在中层(约 5 km 高度)最开始形成中气旋速度分布特征,并向上、向下扩展,具有旋转上升气流的特征。在中气旋底部,四周的气流流向中气旋中心所在的位置,即有辐合型气流。

(2)成熟阶段:成熟阶段的旋转速度达到峰值,是中气旋最强的阶段,并且具有形成龙卷的潜在趋势。在此阶段,中气旋核区达到最下层,增长的厚度也达到最大。此时具有上升气流,同时也有下沉气流。成熟阶段中气旋的不同高度层上具有不同的速度特征,可分为 4 个不同高度,图 2 为该阶段 4 个不同高度气旋气流结构特征示意图。在低层,中气旋的旋转气流与上升气流下层辐合气流并存,是辐合旋转型气流,如图 2(a)所示。在中下层,是纯气流旋转场,气流结构如图 2(b)所示。在中上层,中气旋气流旋转与气流的辐散相结合,是辐散旋转型气流场,如图 2(c)所示。在中气旋的顶部,是纯辐散气流场,如图 2(d)所示。

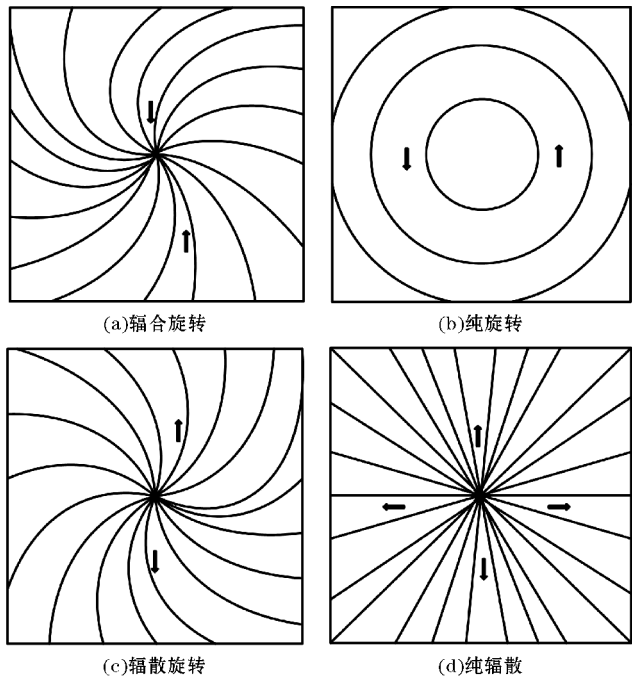


图 2 中气旋不同高度下的速度特征

(3)消亡阶段:消亡阶段气旋中气流的旋转速度逐渐减小,同时气旋所在高度大幅度地降低。最后,中气旋仅存于很小的区域,低层气流从旋转中心向四周辐散。

在中气旋发生的整个过程中,生成阶段和消亡阶段的生存时间一般比较短,大约几分钟。而成熟阶段的生存时间较长,所以雷达探测到中气旋时,中气旋大多已处于成熟阶段。

1.3 龙卷

龙卷分为超级单体龙卷和非超级单体龙卷,一般

比较强的龙卷都是由超级单体产生的。龙卷通常伴随着低层地面附近的中气旋出现而产生,而由于低层附近的中气旋只有在离雷达距离很近的情况下才能被探测到,所以龙卷的预警一般建立在雷达探测到中层中气旋的基础上。非超级单体龙卷有很多类型,该类龙卷具有尺度小、生命周期短的特点,因此雷达难以预警此类龙卷的发生。龙卷的发生和发展与强烈的上升气流和下沉气流有关,并且还与环境风的切变与上升气流和下沉气流之间的相互作用相关。龙卷的发生总有直径在几十米到几百米的漏斗状云(图3),有的龙卷能伸展到地面,造成地面灾害;有的龙卷在空中形成漏斗状云,未接地面。大多数龙卷气旋式旋转(气旋环流为逆时针方向),少数是反气旋式旋转(气旋环流为顺时针方向)。



图3 龙卷漏斗状云

超级单体龙卷生成于中气旋,且发生在中气旋旋转核心区,旋转速度比中气旋大得多。一般来说,中层中气旋越强,发生龙卷的概率就越大。当雷达探测到强烈的中层中气旋或者伸展到地面附近中等强度以上的中气旋时,40%的概率发生超级单体龙卷灾害性天气,但并不是所有的中气旋都可以发展成龙卷。对于超级单体龙卷,强烈的低层垂直风切变和低的抬升凝结高度是其发生的有利环境条件。目前学术界普遍认为,典型的龙卷形成过程通常包括4个关键步骤^[16]:①大气的不稳定性产生强烈的上升气流;②由于与在垂直方向上速度和方向均有切变的风相互作用,上升气流在对流层的中部开始旋转,形成中尺度气旋;③随着中尺度气旋向地面发展和向上伸展,变细并增强。同时,小面积的增强辐合,即最初的龙卷形成与气旋内部,产生气旋的同样过程,形成龙卷核心;④龙卷核心中的旋转与气旋的不同,其强度足以使龙卷一直伸展到地面。当发展的涡旋到达地面时,地面气压急剧下降,地面风速急剧上升,形成龙卷。

一般的龙卷发生在中气旋核区内,且其速度分布满

足蓝金理论,所以其风场结构具有跟中气旋相同的特点,可以利用蓝金模式来模拟,图4表示了一个处于中尺度气旋核区内的龙卷位置,弯曲的箭头区域是龙卷。

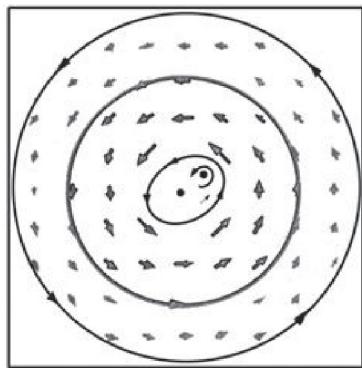


图4 发生在中气旋核区内的龙卷

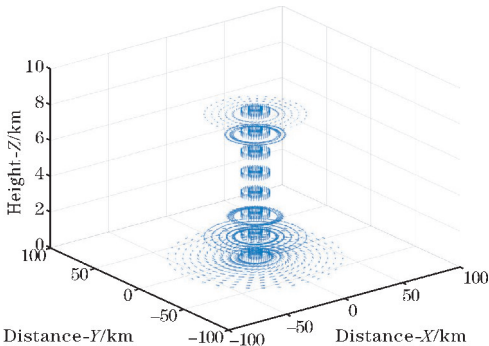
2 中气旋和龙卷径向特征模拟

多普勒天气雷达探测中气旋及龙卷时具有局限性,波束中心高度随距离增加而增加,波速宽度随距离增加而展宽,对于探测中气旋具有很大影响。第一个局限性是雷达很难探测到远距离中小尺度的气旋,甚至无法探测到远距离处的中气旋。第二个局限性是随着离雷达距离的增加识别中气旋的难度也在增加。由于雷达最大探测范围的限制,超过一定距离(例如200 km)外的中气旋无法识别到。此外,速度数据距离折叠也是影响中气旋与龙卷识别的一个重要影响因素。

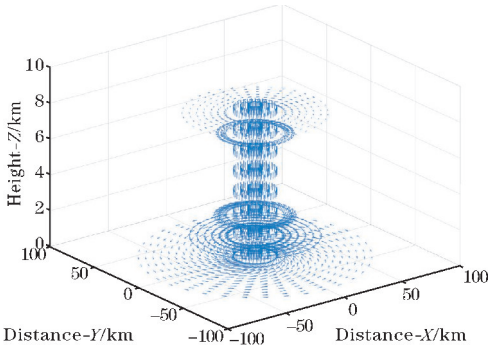
以雷达位置为原点建立坐标系,给定中气旋与龙卷相对于雷达的位置及雷达参数、中气旋参数和龙卷参数;根据这些条件反演出中气旋与龙卷气流速度场,并利用雷达对其进行探测。在使用蓝金模式构建出的中气旋与龙卷时,中气旋与龙卷所在范围内的每一点(相对于雷达坐标)的气流速度都有相应的方向和大小(以箭头表示),如图6所示;在多普勒径向速度的计算上,以气流旋转速度在径向上的投影为该径向距离库上的值,即将所反演出的中气旋以及龙卷数据映射到雷达径向数据中,并进行径向速度PPI显示。

2.1 中气旋径向特征

根据前面的理论介绍,对于处于成熟阶段的中气旋,虽然在不同高度层具有不同的气流结构,但不同高度层的气流旋转速度分布同样满足蓝金理论,可构建出成熟阶段中气旋的三维气流速度场,图5是利用蓝金模式模拟出的2个不同强度不同范围的中气旋三维结构,以气旋半径表示中气旋的所在范围。



(a) 小尺度中气旋



(b) 大尺度中气旋

图 5 2 个不同尺度的中气旋三维结构

2 个中气旋参数见表 1。

表 1 中气旋参数

中气旋编号	高度/km	气旋半径/km	核半径/km	峰值速度/(m/s)
a	8	60	10	40
b	8	80	15	60

其中 Z 轴表示离地面的高度,中气旋的三维图中,最下层的气流速度场满足辐合旋转型特征,中层附近气流符合纯旋转特征,中上层气流符合辐散旋转型特征。在中气旋的各高度层上,气流旋转速度分布满足蓝金模式,气旋核心处旋转速度为零。

当多普勒天气雷达探测到垂直对称环流气旋或反气旋时,其径向速度回波图上,从环流中心(速度为零起),在核半径以内,径向速度大小随着离环流中心距离的增大而增大,在核半径处达到最大值;而在核半径以外,径向速度大小随距离环流中心的增大而递减,图 6 模拟了 3 种气流结构特征以及对应的多普勒速度,从速度图上可见,都符合上述特征。

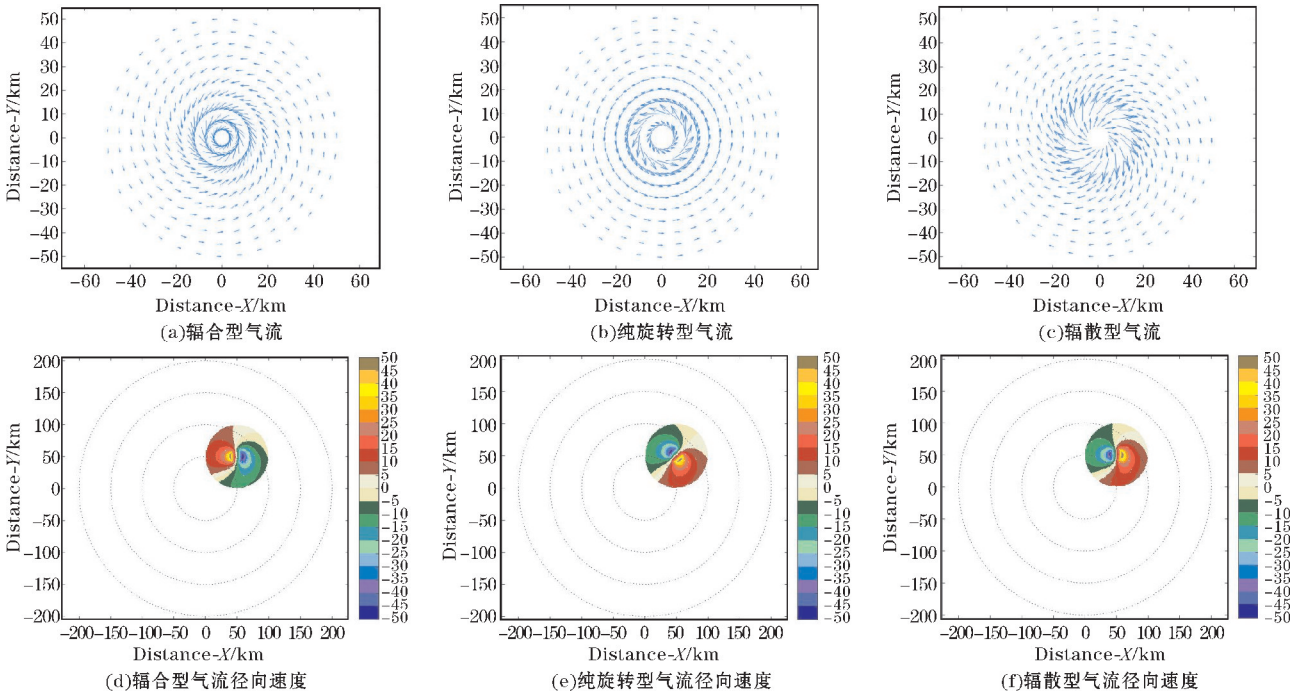


图 6 3 种不同类型的气流及其对应的径向速度

气旋位于东北方向上距离雷达约 70 km 处(相对于雷达位置),所以多普勒速度零值带与水平线刚好成 45° 。雷达在观测气旋环流时,多普勒零值带沿着雷达径向穿过环流中心。由于大气环流逆时针方向旋转,所以在雷达视线的右边,气流的方向是远离雷达的,而在雷达视线的左边,气流向雷达方向运动。所

以,在零值带的下侧是径向速度正值区,代表离开雷达的气流速度,正值最大的位置离环流中心的距离正好是核半径 R ;在零值带的上侧为径向速度的负值区,代表朝向雷达的气流速度,径向速度在距离环流中心 R 处取得最小值。可见,正(负)速度中心离开雷达的距离相等,呈方位对称。

表2 中气旋与雷达参数

气旋型号	中气旋参数			雷达参数		
	气旋半径/km	核半径/km	峰值速度/(m/s)	波速宽度/(°)	距离库长/m	最大探测距离/km
辐合旋转型	50	10	50	1	250	200
纯旋转型	50	10	50	1	250	200
辐散旋转型	50	10	50	1	250	200

2.2 龙卷径向特征

多普勒天气雷达对龙卷的预报和分析提供了方便,已成为判断龙卷是否存在的重要依据。但同时也有弊端,大多龙卷尺度较小,直径在几百米左右,并且当龙卷发生的位置离雷达的距离较远时,从雷达回波图上无法识别龙卷特征。这是由于龙卷位置离雷达较远时,雷达波速中心在龙卷所在处高度较大,且波速宽度也较宽,落在龙卷范围内的径向数极少,甚至只有一条径向穿过龙卷所在的范围内,所以只有少数径向才有龙卷的特征;而要能够在多普勒速度 PPI 图识别出龙卷特征,需要雷达多条径向穿过龙卷所在范围内,所以会出现无法识别龙卷的情况。图7模拟了发生在中

气旋核区内不同核半径的龙卷和对应的多普勒速度图像,红色区域即为龙卷发生的区域。从2幅多普勒速度图中都可以明显地观察到,速度廓线呈轴对称分布,且速度分布符合蓝金理论,有中气旋存在的特征。多普勒零值带与水平线成45°,由此可以推断出中气旋发生的方位角;且零值带下方是正值区,上方是负值区,所以中气旋的风场结构属于逆时针旋转气旋。其中龙卷母云中气旋参数相同,见表3。

表3 龙卷母云中气旋参数

中气旋半径/km	核半径/km	峰值速度/(m/s)
50	10	30

龙卷参数以及对应的雷达参数设置见表4。

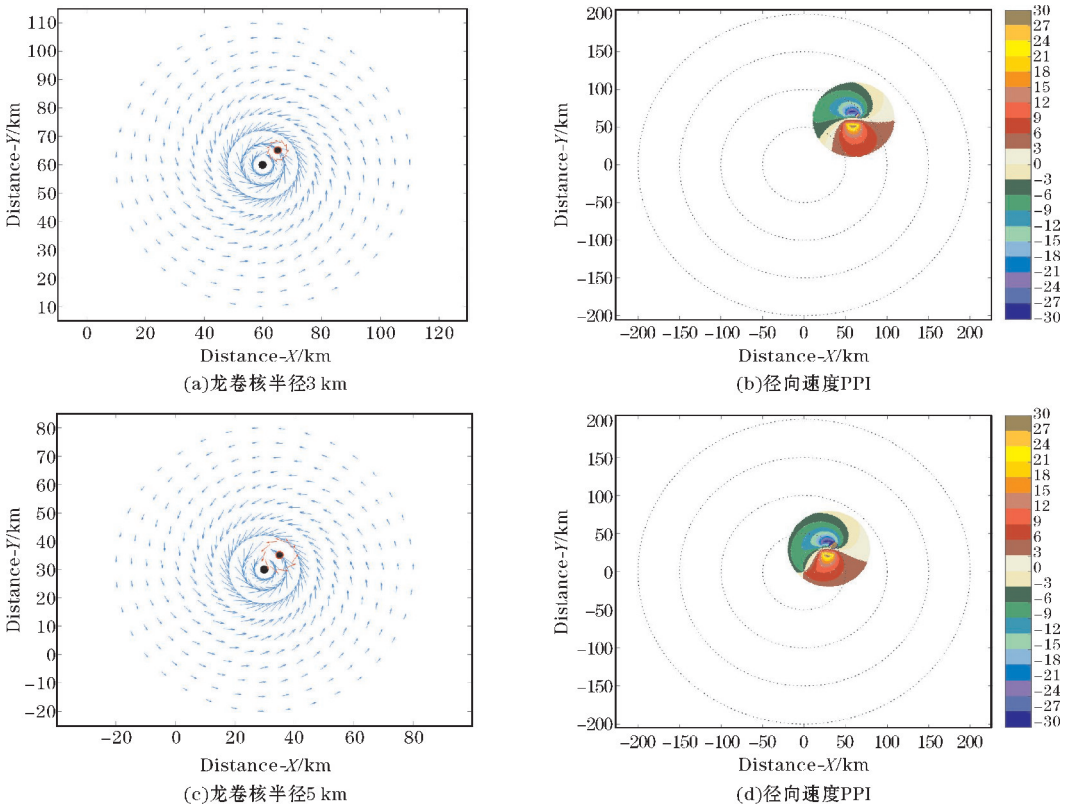


图7 发生于核区内的龙卷及其多普勒速度图

表4 龙卷与雷达参数

龙卷编号	龙卷参数		雷达参数		
	峰值速度/(m/s)	核半径/km	波速宽度/(°)	距离库长/m	最大探测距离/km
a	110	3	1	250	200
b	110	5	0.5	250	200

龙卷峰值速度相同,且中气旋发生位置方位角相同,都在东北方向上;不同的是雷达波速宽度、龙卷核半径以及龙卷位置离雷达的距离。由图7可见,当龙卷尺度较大,发生位置离雷达距离较近,且雷达波速宽度较小时,雷达能探测到龙卷的特征,在多普勒速度图像上能引起直观的效果;在龙卷所在处,多普勒速度图上几乎出现了所有的颜色,颜色变化梯度较大。然而,龙卷尺度较小,发生位置距离雷达较远,且雷达波速宽度较大时,雷达无法探测到龙卷的存在,在雷达回波图上无法识别出龙卷特征。

3 结束语

研究了中气旋以及龙卷的形成机理及中气旋与龙卷在多普勒径向速度图上的特征标志。首先,介绍了蓝金模式下的速度分布特征,并利用蓝金气旋理论反演出中气旋的二、三维结构;然后,同样利用蓝金模式反演出中气旋核区内部发生龙卷的情况,即龙卷气旋速度场。最后,以所反演出的中气旋和龙卷速度场作为雷达探测目标,根据多普勒雷达径向速度与实际风向的关系,把中气旋与龙卷速度映射到径向上的每个距离库上,生成中气旋与龙卷的回波数据,并进行径向速度PPI显示。结果表明多普勒速度图与实际情况相吻合,可从多普勒速度图上识别出中气旋与龙卷的径向特征。其中可根据需要自行设置雷达参数、中气旋参数和龙卷参数。值得注意的是,当龙卷尺度较小,且龙卷发生位置离雷达较远,雷达波速较宽时,雷达无法探测到龙卷的存在,只能从雷达回波图上观察到其母云中气旋的存在。

致谢:感谢成都市科技项目(2016-XT00-00015-GX)对本文的资助

参考文献:

- [1] 郑媛媛,俞小鼎,方翀,等. 一次典型超级单体风暴的多普勒天气雷达观测分析[J]. 气象学报, 2004, 62(3): 317-328.
- [2] 吴芳芳,俞小鼎,王慧,等. 一次强降水超级单体风暴多普勒天气雷达特征[J]. 大气科学学报, 2010, 33(3): 285-298.
- [3] 冯晋勤,汤达章,俞小鼎,等. 新一代天气雷达中气旋识别产品的统计分析[J]. 气象, 2010, 36(8): 47-52.
- [4] 魏文秀,赵亚民. 中国龙卷风的若干特征[J]. 气象, 1995, 21(5): 36-40.
- [5] 焦中生. 气象雷达原理[M]. 气象出版社, 2005.
- [6] 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(5): 914-924.
- [7] Xu Q, Wei L, Nai K. Analyzing Vortex Winds in Radar-Observed Tornadoic Mesocyclones for Now-cast Applications [J]. Weather and Forecasting, 2015, 30(5): 1140-1157.
- [8] Wood V T, White L W. A Parametric Wind-Pressure Relationship for Rankine versus Non-Rankine Cyclostrophic Vortices [J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2013, 30(12): 2850-2867.
- [9] Brown R A, Wood V T. Detection of the Presence of Tornadoes at the Center of Mesocyclones Using Simulated Doppler Velocity Measurements [J]. Weather & Forecasting, 2015, 30(4).
- [10] Burgess D W. Single Doppler radar vortex recognition. Part I: Mesocyclone signatures [C]. 1976.
- [11] Browning K A, Foote G B. Airflow and hail growth in supercell storms and some implications for hail suppression [J]. The Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1976, 102(433): 499-533.
- [12] Doswell C A I, Burgess D W. Tornadoes and toradic storms: A review of conceptual models [J]. Washington Dc American Geophysical Union Geophysical Monograph, 1993, 79.
- [13] Lee B D. The Numerical Simulation of Non-Supercell Tornadoogenesis [J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 1995, 54(1): 32-60.
- [14] Tripoli G J. An explicit three-dimensional non-hydrostatic numerical simulation of a tropical cyclone [J]. Meteor. atmos. phys, 1992, 49(1-4): 229-254.
- [15] Wicker L J. a Numerical Simulation of a Tornado-Scale Vortex in a Three-Dimensional Cloud Model [J]. Water Science & Technology A Journal of the International Association on Water Pollution Research, 1990, 55(5): 249-56.
- [16] Davies-Jones, Robert. A review of supercell and tornado dynamics [J]. Atmospheric Research, 2015, 158-291.

Simulation of Radar Echo from Mesocyclones and Tornadoes based on Rankine Model

JIELA Qutie, WANG Haijiang, GAO Mengqing, HE Jiaoyang

(College of Electronic Engineering, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 601225, China)

Abstract: In the formation process of a mesocyclone that is the features of hazardous convective weather can be divided into three stages: generation stage, maturity stage and extinction stage. A mesocyclone in maturity stage has diverse velocity characteristics at four different altitudes. The probability of a tornado occurring in a strong mesocyclone or a mesocyclone with moderate or higher intensity extending near the ground is about 40%. Multiple tornadoes occur in the center of mesocyclones, but not all of the mesocyclones can develop into tornadoes. Doppler weather radar is a kind of radio-frequency sensor that can detect mesocyclones and tornadoes, but the amount of echo data available to apply is limited, so the numerical simulation of mesocyclones and tornadoes is an alternative. In this paper, the wind field of mesocyclone and tornado in the center of mesocyclone are initially simulated by Rankine model. Then the mesocyclone and tornado echo data can be generated and then display the Doppler radar velocity image after the wind fields are sounded by Doppler radar. The generated echo data generated can be applied to the verification of mesocyclones and tornadoes identification algorithm.

Keywords: mesocyclone; tornado; Rankine model; echo data