

环绕雷暴的中层气流和同时存在两个辐散区 多普勒雷达风场速度的模拟

胡诗朋¹, 王海江¹, 何姣阳¹, 李 静², 王国强², 徐自励²

(1. 成都信息工程大学电子工程学院, 四川 成都 610225; 2. 中国民航局第二研究所, 四川 成都 610041)

摘要: 基于风矢量与其分量之间的数学关系, 主要通过数学模型构造风场, 增加一定的假设条件进行计算, 模拟同时存在两个辐散区的风场和环绕雷暴上升区的中层气流场。得出: (1) 当同时有两个辐散区相互作用时, 多普勒速度回波特征是由两个辐散场的线性叠加产生的。通过分析反演图像, 实验结果表明提出的方法可以形成具有代表性的风场, 对复合风场的线性叠加具有很好的模拟效果。(2) 在雷暴这种剧烈的天气现象中, 由于中层的环境风场受到上升气流的阻碍, 会形成辐合带, 为雷暴的发生提供有力的动力条件, 从而导致近地面的各种气象要素发生变化, 这种气象的变化对雷暴的发生有一定的指示作用。(3) 在反演风场中加入数学模型确实能得到理想的效果, 并且在实验场内就能观察不同风场的情况, 为以后分析复杂风场提供了方便。

关键词: 风场; 模拟; 叠加

中图分类号: TN985.2

文献标志码: A

doi: 10.16836/j.cnki.jcuit.2020.01.002

0 引言

风场在研究天气变化中担当着不可或缺的角色。一方面, 风场的变化在水汽的运输中起着极为重要的作用; 另一方面, 风场的变化也会触发不同的天气气候^[1]。在中国东部沿海, 风场变化导致对流强弱不同, 形成的雷暴给当地的人民造成了巨大的经济损失^[2]。

数值模拟方法是目前进行雷暴危险性分析^[3]和估算极值风速普遍采用的方法, 已有较多的风场模型应用于复合风场的风速分析^[4]。应用精确的大气物流模型和相关资料^[5], 采用数值方法模拟风场^[6]进行灾害性天气分析是国际上通常采用的方法。Chakrabarti^[7]最先采用经典模型计算极值, 估计墨西哥湾的台风风速。李茜等^[8]在 Shapiro 研究基础上采用了数值方法求解大气运动的动量方程^[9], 其风场模型结合先进的仿真技术有效解决了风速分布问题, 美国 ANSI 和澳大利亚 SAA 设计的风速图就利用了 Shapiro 这种数学模型。

文中模拟风场主要是构造数学模型^[10], 与多普勒雷达反演出来^[11]的真实风场相比较, 此方法不需要雷达进行探测就能模拟产生风场的雷达回波图。在室内就能完成场外的试验, 从而降低成本、缩短研究时间和维护周期。通过设置相应的参数, 做到定量测试, 对处理的图像进行分析, 这是模拟器所具有的优势。

通过仿真软件模拟^[12], 对环绕雷暴上升区的中层

气流和同时存在两个辐散区的结构进行分析, 该方法提高了模拟结果的可靠性和精准度。同时分析风场的变化情况, 观察复合场风场的特点, 推测雷暴、大风、风切变等天气过程, 在探测危险性天气过程和降水量强度上起着重要作用。反演结果表明, 该回波模拟器可以得到环绕雷暴上升区的中层气流和同时存在两个辐散区的速度场和多普勒速度图。

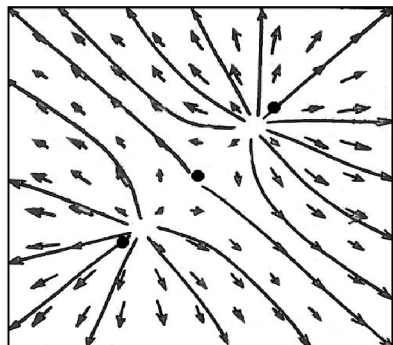
1 同时存在两个辐散区的结构

风暴是飚线一类较大天气系统的一部分^[13], 可以产生破坏性的风和冰雹。大多数风暴的内部剧烈运动比较难通过肉眼观测到, 所以可以构造数学模型推测风暴的内部运动。当环境风的切变很强且对流不稳定性相当大时, 就会出现快速的上升气流, 导致净浮力的增加。上升气流与切变的环境风相互作用组成气流, 使得中间层的干燥空气不断被蒸发的降水冷却, 从而快速下沉(因为冷却的空气密度大)。浓密的低层外流也提升了边界层较低密度的潜在不稳定空气^[14-16], 从而使新的对流生成。

在一个单体顶部和近地面, 能够观测到辐散现象, 因为此时顶部气流在上升过程中会向四周扩散, 形成辐散^[17]。与此同时, 在该风暴的近地高度上, 存在下沉气流, 气流在下沉的过程中, 同样会向四周扩散, 形成辐散^[18]。所以同时存在两个辐散流场, 且风暴的高度不大时, 上升气流和下沉气流还会相互接近。

如图 1(a), 有两个大小和强度都相同的辐散区的

流场,核半径都是9.3 km,强度是74 km/h的辐散区,两辐散区的中心相距27.8 km,其连线与雷达视线成 45° 角。两个流场中心位置相距一定的距离,从单个辐散流场中知道辐散是一个轴对称的流场结构,存在一个中心,然后从中心向四周均匀地扩散。在这里由于存在两个流场,而且相互接近,所以相互影响和作用,并且两个流场影响的程度一致。图1(b)是多普勒速度图像,负值代表朝向雷达的方向,正值代表离开雷达的方向。



(a) 流场



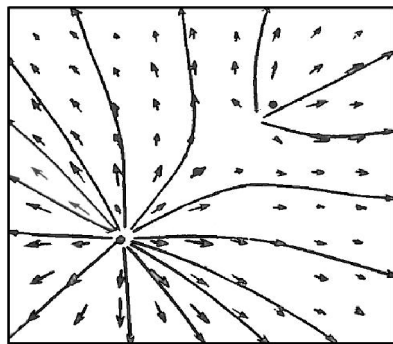
(b) 多普勒速度图像

图1 相同强度的两个流场分布图

图2中,两个辐散场同时存在,与前面不同的是,这两个流场的大小和强度都有差异,左下方的辐散区的核半径是9.3 km,而右上方的辐散区的核半径是4.6 km。左下方的辐散的强度是74 km/h,右上方的辐散的强度是37 km/h。由于存在大小和强度上的不同,导致多普勒速度图像上发生了很大的变化。

2 环绕雷暴上升区的中层气流的分布图

雷暴泛指深厚对流现象,狭义上指伴有雷电的深厚湿对流^[19]。大气中深厚湿对流的发生需要垂直层结构的不稳定(静力不稳定)、水汽和抬升触发3个条件。同时,大气中风向随高度的变化(垂直风切变),而且云和降水的微物理过程对大气深厚湿对流的形成和演变都有影响。



(a) 流场



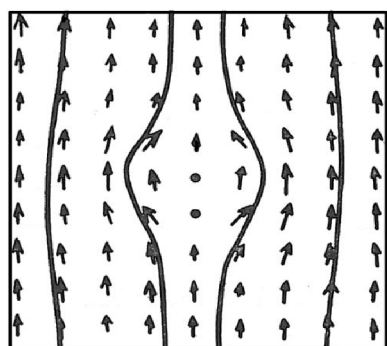
(b) 多普勒速度图像

图2 不同强度的两个流场分布图

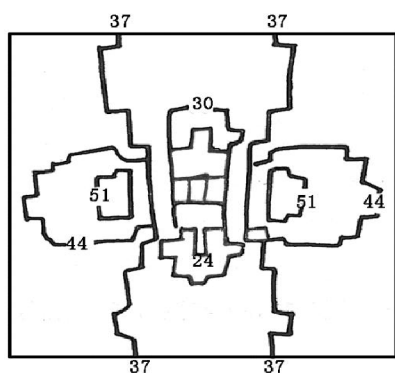
雷暴生成需要有持续的抬升力将地面气块抬升,直到自由对流高度以上,即抬升触发机制。Doswell^[20]指出,触发雷暴的主要原因是中尺度的上升运动,而天气尺度的上升运动通常不会直接触发雷暴,而是使大气变得更加不稳定。这些触发雷暴的中尺度系统主要包括边界层辐合线、中尺度地形和中尺度重力波,雷暴的流出边界(阵风锋)、锋面、干线、海风锋辐合线、边界层水平对流卷等,特别重要的是边界层中尺度辐合线(或称为边界)^[21]。

在强雷暴发展的早期阶段,上曳气流内部,水汽发生冷凝,在温度等于 0°C 的高度上,冰冷的雨滴开始冻结,释放出更多的潜热,进一步增加了上升气流的浮力。下曳气流中含有大量干燥中层空气,其中还含有降水上的曳气流。当干燥空气由西南向西方向接近风暴时,部分干燥空气发生偏转开始绕着上曳气流塔运动,强烈的非旋转性上升气流对中层的环境风场起着阻碍的作用,就如同障碍物一样。因此,空气被迫从上升气流区的两端绕过去,风速由于气流压缩而加快。同时,随着上升气流上部的空气被带到下游,其中一部分空气落到背风面的下沉气流中,相对风暴的垂直地环流发展。在风暴的低层部分,相对风暴从下沉气流向上升气流的回流发展。随着这个环流的加强,低层回流区开始增厚,由于它与盛行风反向,相对地面的风速极小值出现在风暴下半部的上升气流与下降气流之间。

图3(a)、图4(a)、图5(a),中心的圆点表示主要特征风场的位置,上游点代表上升气流,下游点代表下沉气流,两侧的点代表相对风暴的反向气流的曲率中心。

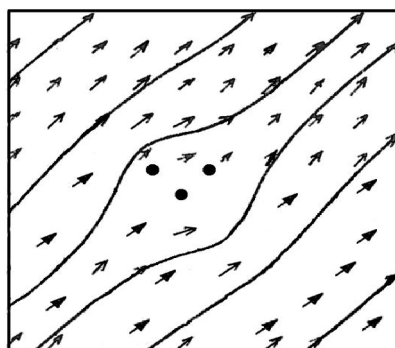


(a) 流场

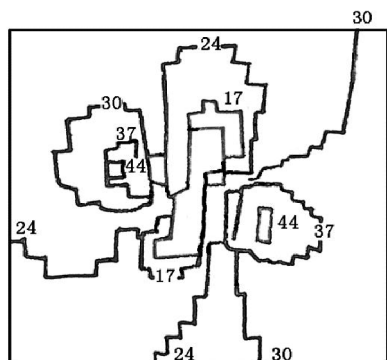


(b) 多普勒速度图像

图3 环境风场与雷达视线平行



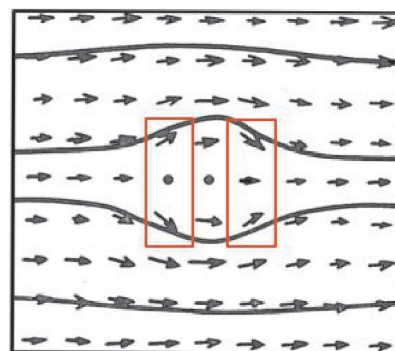
(a) 流场



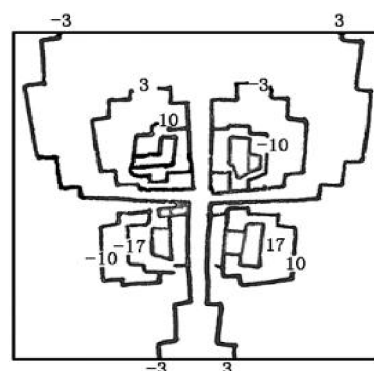
(b) 多普勒速度图像

图4 环境风场与雷达视线成45°角

图3(b)的多普勒速度图像表明在上升或下沉气流的两侧出现风速极大值,在上升和下沉气流之间出现风速极小值。图4 环境风场的风向虽然改变了45°,多普勒速度图像变化不大。当环境风场垂直于雷达视线时,将发生重大变化。如图5(a)所示,明显地看到,左方框标记的上风向辐散,而右侧的方框为下风向辐合,右侧是气旋性环流,左侧是反气旋环流。



(a) 流场



(b) 多普勒速度图像

图5 平均环境风场与雷达视线垂直

3 反演方法解析

3.1 双辐散场的反演方法

一个风场有它的峰值速度,中心位置,辐散的半径(辐散范围)和辐散核的半径。为了实现风场模拟,首先要在图像上确定两个辐散场的分布范围。假设辐散场1 在平面上的位置为 (x_1, y_1) ,辐散场2 在平面上的位置为 (x_2, y_2) ,场1 的辐散半径为 r_1 ,辐散场2 辐散为 r_2 。那么两个辐散区域的在二维坐标上的范围为

$$\text{Start}X = \min(x_1 - r_1, x_2 - r_2) \quad (1)$$

$$\text{Start}Y = \min(y_1 - r_1, y_2 - r_2) \quad (2)$$

$$\text{End}X = \max(x_1 + r_1, x_2 + r_2) \quad (3)$$

$$\text{End}Y = \max(y_1 + r_1, y_2 + r_2) \quad (4)$$

通过式(1)~(4)得到了复合风场的范围,如图6所示。

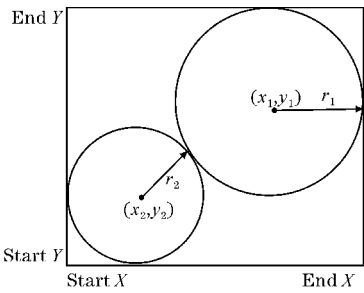


图6 复合风场的范围

当两个辐散场存在公共叠加部分时,两个场的风矢量则需要线性叠加,设场1辐散核的半径为 N_{R_1} ,场2辐散核的半径为 N_{R_2} ,场1的辐散速度峰值为 v_{\max_1} ,场2的辐散速度峰值为 V_{\max_2} 。

令 $C_{11} = \frac{V_{\max_1}}{N_{R_1}}$ $C_{12} = V_{\max_1} \times N_{R_1}$

$C_{21} = \frac{V_{\max_2}}{N_{R_2}}$ $C_{22} = V_{\max_2} \times N_{R_2}$ (5)

辐散场1上某处观测点位置为 (x_{c_1}, y_{c_1}) ,其中 R_1 为辐散场1上的某处观测点 (x_{c_1}, y_{c_1}) 到场1 (x_1, y_1) 的距离, R_2 为辐散场2上的某处观测点 (c_{c_2}, y_{c_2}) 到场2 (x_2, y_2) 的距离。离辐散中心的距离不同,其速度也存在变化,因此在不同范围上设置不同风速。

$$v_{x_1} = \begin{cases} C_{11} \times (x_{c_1} - x_1), & R_1 < N_{R_1} \\ \frac{C_{12}}{(x_{c_1} - x_1)}, & N_{R_1} < R_1 < r_1 \end{cases} \quad (6)$$

$$v_{y_1} = \begin{cases} C_{11} \times (y_{c_1} - y_1), & R_1 < N_{R_1} \\ \frac{C_{12}}{(y_{c_1} - y_1)}, & N_{R_1} < R_1 < r_1 \end{cases} \quad (7)$$

$$v_{x_2} = \begin{cases} C_{21} \times (x_{c_2} - x_2), & R_2 < N_{R_2} \\ \frac{C_{22}}{(x_{c_2} - x_2)}, & N_{R_2} < R_2 < r_2 \end{cases} \quad (8)$$

$$v_{y_2} = \begin{cases} C_{21} \times (y_{c_2} - y_2), & R_2 < N_{R_2} \\ \frac{C_{22}}{(y_{c_2} - y_2)}, & N_{R_2} < R_2 < r_2 \end{cases} \quad (9)$$

其中 $v_{x_1}, v_{y_1}, v_{x_2}, v_{y_2}$ 分别是场1和场2在公共部分

各自风矢量在二维平面上的分量,则有

$$\begin{cases} v_x = v_{x_1} + v_{x_2} \\ v_y = v_{y_1} + v_{y_2} \end{cases} \quad (10)$$

其中 v_x 和 v_y 分别是场1和场2在公共部分上线性叠加后的速度分量。通过速度分量的线性叠加,成功得到了复合场的风矢量,最后在仿真软件上进行叠加。

3.2 双辐散场的反演方法

雷暴中的中层气流由于气压的变化可分为上升气流和下沉气流,假设中层气流场在平面上的位置为 (x_1, y_1) ,垂直气流的半径为 R ,流场中的画图间隔参数为 d ,水平方位角为 θ ,令 $f = \frac{\pi}{180}$,则上升气流的位置为

$$\text{rise}X = x_1 + \frac{(2R+d) \times \cos\theta \times f}{2} \quad (11)$$

$$\text{rise}Y = y_1 + \frac{(2R+d) \times \sin\theta \times f}{2} \quad (12)$$

同理,下降气流的位置为

$$\text{decline}X = x_1 - \frac{(2R+d) \times \sin\theta \times f}{2} \quad (13)$$

$$\text{decline}Y = y_1 - \frac{(2R+d) \times \sin\theta \times f}{2} \quad (14)$$

通过式(11)~(14)就能确定上升气流和下沉气流的位置,通过模拟器在软件上构造它的位置和分布情况。

4 反演及结果分析

4.1 双辐散气旋的反演

文中使用GUI界面模拟双辐散气旋的反演,设置两个气旋的位置,强度,以及尺度等参数信息,后台通过这些参数,对双辐散气旋进行反演,并对流场图进行显示,然后通过雷达生成的PPI数据,可以根据自己的需求,设置雷达的波束宽度,距离分辨率和最大探测距离。如表1和表2所示设置两个关于原点对称的两个气旋,其强度以及尺寸都相同,映射到雷达的PPI数据中进行显示。

表1 两个尺度相同的辐散场参数取值

	辐散速度峰值 $V/(\text{m/s})$	辐散半径 R/km	辐散核半径 NR/km	位置 X/km	位置 Y/km
辐散场参数 1	60	50	10	15	15
辐散场参数 2	60	50	10	-15	-15

表 2 雷达参数 1

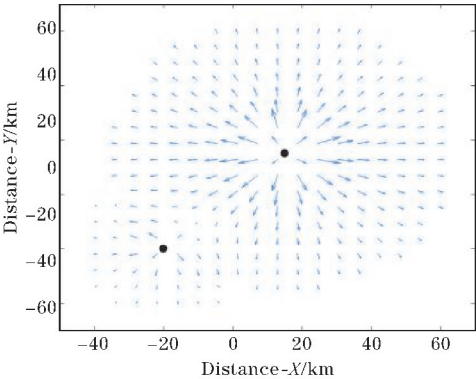
波束宽度/(°)	距离分辨率/m	最大探测距离/km
1	250	200

如图 7 所示的双辐散速度场,辐散场 1 和辐散场 2 关于坐标原点对称(文中规定图右上角的风场为辐散场 1,左下角的风场为辐散场 2,后文均如此)。由于强度和尺寸都一样,辐散中心均匀地向四周扩散,但两个辐散场的方向不同。可以看出两个流场影响的程度是一致的。将双辐散气旋对应的矢量数据,映射到雷达的 PPI 数据中,在 PPI 上进行显示,从图 7(b)可以看出,生成的速度 PPI 图在斜方向上镜像对称,其特征与两个风场的反演情况大体一致。

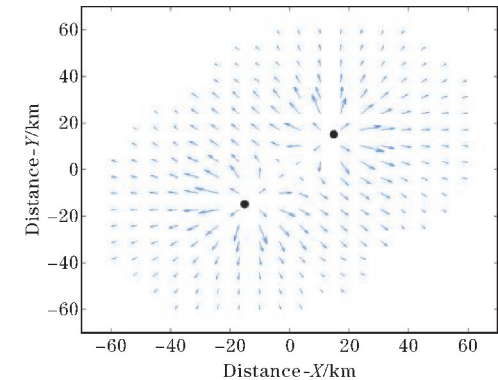
表 3 设置一个辐散场 1 和辐散场 2 在位置、强度、及尺度完全不同的情况,设置的雷达参数跟之前保持不变。反演的效果如图 8 所示,与前面不同的是两个场的大小和强度和大小完全不同,所以导致速度场的图像与雷达回波图在结构上发生了很大的变化。辐散场 1 由于设置的强度比辐散场 2 大一些,所以导致两个风场合成的复合场在范围上分布不均匀,不同位置的风的矢量与图 7 相比也大不相同。从图 9(b)可以清晰地看出,风场的变化导致生成的径向速度 PPI 图一大一小,强度有所不同。

表 3 两个尺度不同的辐散场参数取值

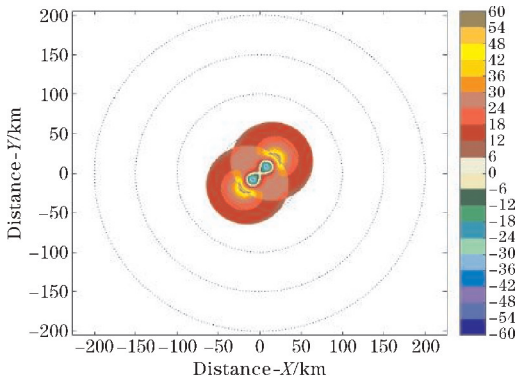
	辐散速度峰值 $V/(m/s)$	辐散半径 R/km	辐散核半径 NR/km	位置 X/km	位置 Y/km
辐散场参数 1	60	50	10	15	15
辐散场参数 2	30	25	5	-20	-20



(a) 双辐散速度场

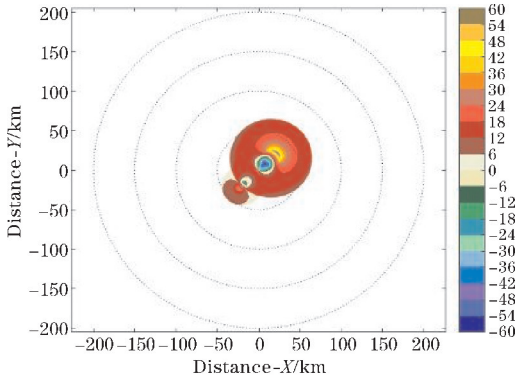


(a) 双辐散速度场



(b) 双辐散场径向速度 PPI 图

图 7 两个强度相同的辐散场反演效果



(b) 双辐散场径向速度 PPI 图

图 8 两个强度不同的辐散场反演效果

4.2 环绕雷暴的中层气流的反演

设置中层气流场的中心位置、水平风场信息及垂直上升气流和下沉气流的直径,后台通过这些参数,对雷暴对应中层气流进行反演,并对流场图进行显示,得

到径向速度 PPI 图,可以根据自己的需求,设置雷达的波束宽度,距离分辨率和最大探测距离。

表 4 和表 5 是设置的中层气流场和雷达参数。根据两个表的参数在后台生成的数据,图 9 是当环境风的风向与雷达探测的方向保持一致性时的反演图。

通过 MATLAB 仿真模拟,图 9(a)通过设定的反演方法生成了两个气流场,通过分析速度场反演图像,观察到由于中层环境风对上升气流起着阻碍作用,空气不得不绕开它继续向上运动,而两侧上升的速度也

随着气流的压缩而加快,所以两个气流交界处的风速增加,方向的改变。通过图 9(b)观察得出,由于上升气流和下沉气流相互对称,所以映射在 PPI 上的径向速度也相互对称。

表 4 与雷达视线平行的中层气流场参数取值

水平风速峰值 $V/(m/s)$	水平风方位角 $Az/(^{\circ})$	垂直气流半径 R/km	气流中心位置 X/km	气流中心位置 Y/km
5	90	1.5	25	0

表 5 雷达参数 2

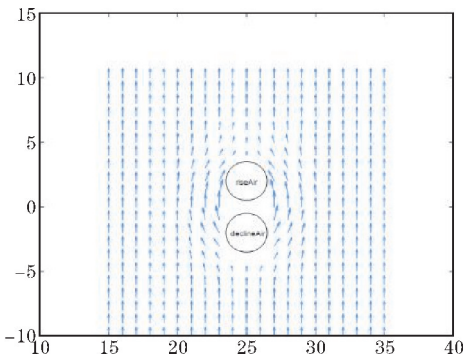
波束宽度/ $(^{\circ})$	距离分辨率/m	最大探测距离/km
1	100	50

表 6 中将修改模拟器中的参数,将环境风场的风向改变 45° ,反演得到中层气流速度场和中层气流场径向速度 PPI 图。通过图 10 可知,由于水平风改变了一定角度,对应的复合风场也将随之发生变化,上升气流和下沉气流两侧的风速同样也将加快运动,而在两个气流之间将出现风速极小值,通过对比图 9,多普勒速度图像变化不大。

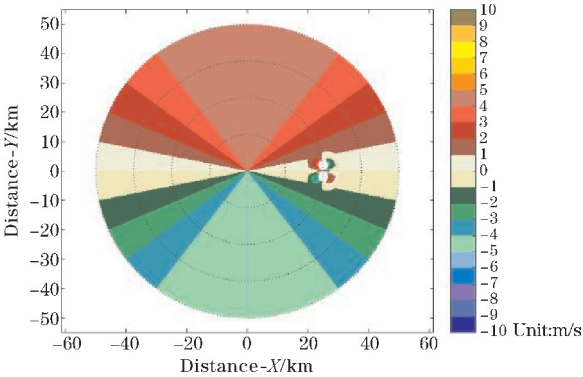
在大气中,空气的辐合辐散的分布是比较复杂的,表 7 中修改水平风的方位角,其他参数保持不变。当环境风垂直于雷达时,由图 11(a)可见,上风向辐散,下风向辐合,多普勒速度图像与图 9 相比,发生了重大变化。辐散的区域会引起下沉运动,下沉的空气会带来晴天;反之,则会出现上升运动,形成云层甚至下雨。而复合风场的右侧将产生气旋性环流,左侧将产生反气旋环流,说明该区域的气流变化非常剧烈。

表 6 与雷达视线呈 45° 的中层气流场参数取值

水平风速峰值 $V/(m/s)$	水平风方位角 $Az/(^{\circ})$	垂直气流半径 R/km	气流中心位置 X/km	气流中心位置 Y/km
5	45	1.5	25	0

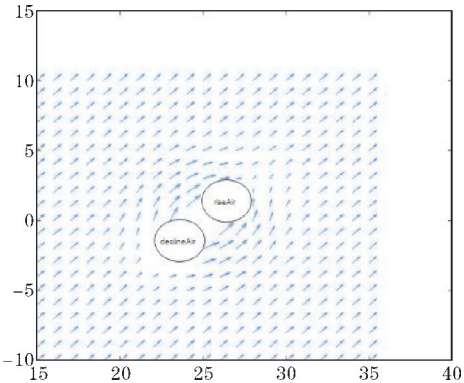


(a) 中层气流速度场

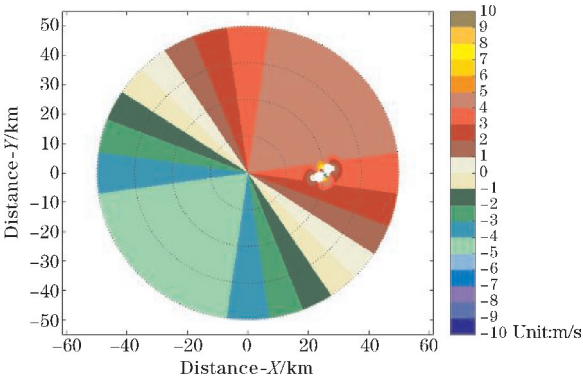


(b) 中层气流径向速度 PPI 图

图 9 环境风场与雷达视线平行反演效果



(a) 中层气流速度场



(b) 中层气流径向速度 PPI 图

图 10 环境风场与雷达视线成 45° 角反演效果

表 7 与雷达视线垂直的中层气流场参数取值

水平风速峰值 $V/(m/s)$	水平风方位角 $Az/(^{\circ})$	垂直气流半径 R/km	气流中心位置 X/km	气流中心位置 Y/km
5	360	1.5	25	0

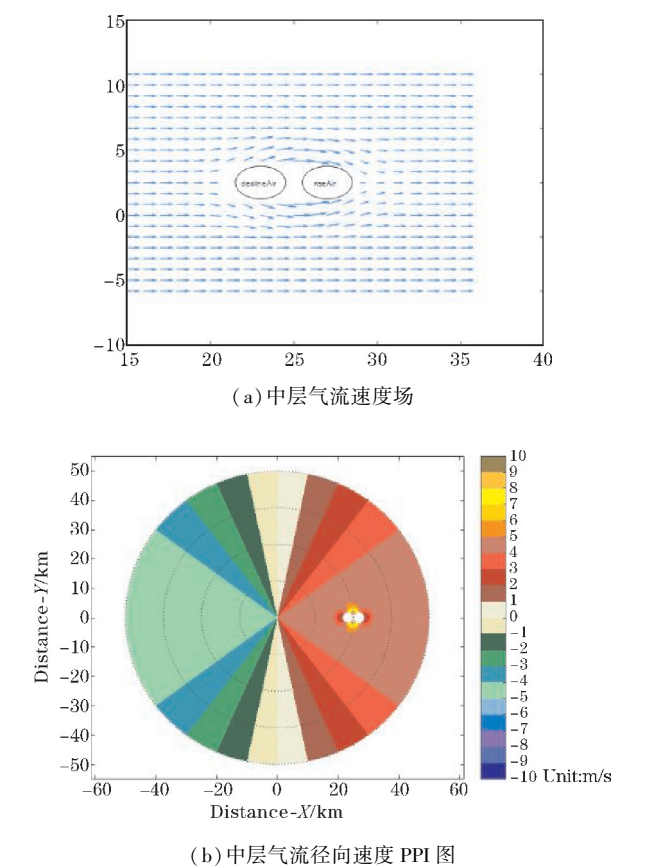


图 11 平均环境风场与雷达视线垂直反演效果

5 结束语

通过回波器模拟器的使用,实现了 MATLAB 对双辐散场和雷暴上升区中层气流的数据模拟。首先提出了双辐散的基本概念和雷暴产生的原因,分析了不同风场的分布特点,解释了反演的办法,阐述了研究目标的基本原理和造成这种天气原因。其中用户自己改变气旋位置,强度等参数,将双辐散气旋和环绕雷暴上升区的中层气流对应的数据映射到雷达的 PPI 数据中,通过观察分析径向速度 PPI 图的分布变化。

此方法从理论上模拟了环境风场在不同天气情况下的反演,对今后的天气预报和、天气系统检测、沿海城市的雷暴灾害性天气的预警等具有重要的意义。如果在今后的实验上,添加更为精准的数学模型,就可以构造各种各样的三维的风场,从多个角度上观察风暴单体,模拟真实的天气情况。仿真结果表明,方法可以直观清晰地模拟出的风场的速度图像。

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] 伍荣生. 现代天气学原理[M]. 北京:高等教育出版社,1999.

[2] 俞小鼎,周小刚,王秀明. 雷暴与强对流临近天气预报技术进展[J]. 气象学报,2012,70(3):311-337.

[3] 张文字. 雷暴分析及其影响[J]. 江苏航空,2010(3):33-34.

[4] 陈严,张锦源,王楠,等. 风力机风场模型的研究及紊流风场的 MATLAB 数值模拟[J]. 太阳能学报,2006,27(9):955-960.

[5] 邹进上. 大气物理基础[M]. 北京:气象出版社,1982.

[6] Doviak R J, Zrníc D S, Schotland R M. Doppler Radar and Weather Observations[J]. Applied Optics,1994,33(21):4531.

[7] Chakrabarti S K. Wave Forces on Submerged Objects of Symmetry[J]. Journal of the Waterways Harbors & Coastal Engineering Division,1973,99:147-164.

[8] 李茜,段忠东. Shapiro 台风风场模型及其数值模拟[J]. 自然灾害学报,2005,14(1):45-52.

[9] Dickinson R. Fundamentals of Atmospheric Physics[J]. Eos Transactions American Geophysical Union,2013,78(7):78-78.

[10] 万齐林,薛纪善,庄世宇,等. 多普勒雷达风场信息变分同化的试验研究[J]. 气象学报,2005(2).

[11] Bringi V N, Chandrasekar V. Polarimetric Doppler Weather Radar (Principles and applications) Dual-polarized radar systems and signal processing algorithms[J]. 2001(6):294-377.

[12] 王丽. 多普勒雷达回波模拟器的设计与实现[D]. 西安:西安电子科技大学,2016.

[13] 张培昌. 雷达气象学[M]. 北京:气象出版社,1988.

[14] Doviak R J, Zrníc D S, Schotland R M. Doppler Radar and Weather Observations[J]. Applied Optics,1994,33(21):4531.

[15] 王彦,吕江津,周海光,等. 暴雨的多普勒天气

- 雷达速度辐合风场特征[J]. 气象, 2008, 34(3): 63–68.
- [16] 盛志军, 周雨, 朱星球, 等. 江西中北部一次飑线过程中尺度特征分析[J]. 江西科学, 2016, 34(5): 642–648.
- [17] Sun J, Crook N A. Real-Time Low-Level Wind and Temperature Analysis Using Single WSR-88D Data[J]. Weather and Forecasting, 2001, 16(1): 117–132.
- [18] 耿全震, 陈受钧. 定常辐散场产生的涡源和定常波能量传播[J]. 大气科学, 1996, 20(3): 298–305.
- [19] Knox R B. Grass pollen, thunderstorms and asthma[J]. Clinical & Experimental Allergy, 2010, 23(5): 354–359.
- [20] RAMSAY, Hamish A, DOSWELL, et al. A sensitivity study of hodograph-based methods for estimating supercell motion[J]. Wea Forecasting, 2005, 20(6): 954.
- [21] 李军霞, 汤达章. 中小尺度的多普勒径向速度场特征分析[J]. 气象科学, 2007(5).

Doppler Radar Wind Velocity Simulation of Middle-layer Airflow Around Thunderstorms and Two Divergence Zones Existing at the Same Time

HU Shipeng¹, WANG Haijiang¹, HE Jiaoyang¹, LI Jing², WANG Guoqiang², XU ZiLi²

(1. College of Electronic Engineering, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China; 2. The Second Research Institute of CAAC, Chengdu 610041, China)

Abstract: Based on the mathematical relationship between wind vector and its components, it is to use a mathematical model construct wind fields mainly, adding some certain assumptions into the numerical calculation to simulate when inversion is simultaneously exists in two wind fields of divergence zone as well as the middle-layer airflow of the riser of rotated thunderstorm. We can conclude that: (1) When two divergence zones interact with each other at the same time, the characteristics of Doppler velocity echo are produced by the linear superposition of two divergence zones. Throughout the analysis of inverted imagines, the result of the experiment shows that the method can form a representative wind field, which has a great simulation effect for the linear superposition of the compounded wind field. (2) In the intensive climate phenomena such as thunderstorm, a convergence band is generated because the middle-layer environmental wind field is prevented by the riser airflow. And it will supply with advantageous dynamic condition for the occurrence of thunderstorm so that leads to the variety of multiple meteorological factors on the ground which have indicative function on the happening of thunderstorms. (3) Not only under the experimental field we can observe variety of circumstances of compounded wind fields, but also the ideal effect can be achieved on the condition of the mathematical model is added into the inversion wind field, it is convenient for analyzing complex wind fields.

Keywords: wind field; simulation; superposition