DOI:10.13878/j.cnki.jnuist.2016.04.002

赵丽玲[1,2]　吴毅[1,2]　刘青山[1,2]　尹忠海[3]

多普勒雷达图像逆风区的自动监测识别

摘要

在多普勒雷达降水回波径向速度场中及时准确地发现逆风区,对灾害天气预报预警具有重要意义.根据逆风区在雷达径向速度图中的物理图像特征,采用数字图像处理和分析方法实现了逆风区自动监测识别.首先,以雷达图像色标为依据,采用阈值法分别获取正、负速度区域二值图像,再对2幅图像分别进行形态学运算,然后将上述4幅图像做交叉逻辑运算,得到逆风区监测识别结果和相关参数.通过在2005—2011年长沙雷达站47幅根据实况进行人工标注后的多普勒雷达径向速度图像上进行实验,表明该方法对逆风区可以进行快速准确识别,与人工标注结果比较准确率可达89%,满足实际应用需要.

关键词

雷达图像;逆风区;形态学;逻辑运算

中图分类号 P409;TP391.41

文献标志码 A

0　引言

逆风区是雷达降水回波径向速度场中观测到的一种现象,在多普勒雷达速度图上有明显的物理图像特征.张沛源等[1]给出了逆风区在多普勒雷达速度图像中的定义:在低仰角PPI没有速度模糊的速度图上,凡在同一方向的速度区中,出现的另一种方向的速度区为逆风区,且风区不能跨越测站原点.蔡晓云等[2]在逆风区识别研究中又加入了"无论是正区包围负区,还是负区包围正区,正负区之间要有零线分割,这块被包围的速度区称为逆风区,逆风区成熟时区中颜色应由浅到深、风速从小到大按色彩层次逐渐过渡".因此,逆风区是雷达图像中具有特殊物理图像特征的区域,且有明显的天气指示意义.逆风区的出现反映了上升气流引起的水平动量交换过程,与强对流天气息息相关[3-4].逆风区存在时基本上都伴有强降水、冰雹、雷雨、大风等剧烈天气过程,且具有发生时间和地点随机性大、生消周期短、危害严重等特点,因此,逆风区是一个很好的灾害性(如暴雨)天气判据[3].当多普勒雷达径向速度图像上出现逆风区时,需要快速准确地进行监测识别,才能提高强对流灾害天气早期预警效率和准确率.目前,气象台站的短时预报将逆风区的出现作为一个重要预报指标,许多学者也致力于对雷达图像中逆风区的监测识别研究.

在国外,对逆风区的监测与识别已有很多研究成果[5],采用基于数字图像自动分析和识别等先进技术进行逆风区自动判别也进入了实际应用阶段[6];在国内,对逆风区的研究主要侧重在系统结构、发生发展、演变机制和地面物理量等方面,对逆风区自动监测识别方法研究尚少.近年来,在中国气象局和一些地方气象局、天津大学、西安电子科技大学等研究机构有一定的研究成果发表.例如:2008年,北京奥运项目引进了美国NCAR的AUTO-Now cast系统,进行本地化研究与开发;河南省气象台引进了灾害性天气预警系统,通过本地化参数设置和资料处理,生成了如"逆风区识别"、"暴雨回波识别"等具有独特业务使用价值的产品;安徽省气象台利用新一代雷达开发定量估测淮河流域面雨量和强对流天气预警系统;天津大学胡大海[7]采用基于图像的边界追踪和连通域的处理等技术判别逆风区取得了一定的满意效果,但该方法会将一些小的速度连通域错误地判别为逆风区,还需要结合人工判定才能进入实际应用;张春[8]以气象学知识和专家经验为基础,运用模式识别与计算机视觉等方法对雷达径

收稿日期 2014-04-22

资助项目 江苏省自然科学基金(BK2012045)

作者简介

赵丽玲,女,硕士,讲师,研究方向为数字图像处理与分析、遥感图像超分辨率复原等.ring_222@126.com

1　南京信息工程大学　信息与控制学院,南京,210044

2　江苏省大数据分析技术重点实验室,南京,210044

3　湖南省气象台,长沙,410118

向速度图像进行处理,并将研究成果应用于雷达云图冰雹自动识别预警系统;李重阳[9]根据多普勒气象雷达采集速度数据生成的回波图像,依据逆风区图形较大且不规则,以及速度值与周围区域差值过大的固有特点,创新性地运用了滤镜、图像增强、改进型序贯算法、双向序列比对等方法识别出了逆风区.诸多研究表明,随着多普勒雷达在我国气象部门的普遍应用,大量雷达图像产品需要进行处理和研究.为了能及时准确地对天气现象进行监测和预报,采用数字图像分析和识别技术自动监测识别多普勒雷达图像正逐步受到研究专家重视,识别的效率和准确率是技术重点.

本文根据多普勒雷达图像逆风区物理图像特征,在深入研究数字图像分析和识别理论基础上,提出了自动监测识别逆风区的新方法.本方法主要采用滤波和逻辑运算等实现逆风区自动识别,通过与人工标注逆风区的雷达图像进行比对,表明本方法具有识别速度快、准确率高的特点,可在实际中开展应用.

1 基本原理

1.1 多普勒雷达径向速度

多普勒雷达利用散射理论,根据接收到的粒子回波信号强度来判断雷达探测区域的整体大气结构,以此得到探测区大气的分布、强度、垂直结构等情况.新一代天气雷达通常采用体扫描的方式,在一系列固定仰角上雷达天线绕垂直的 Z 轴进行 360°扫描(PPI 显示方式扫描),采集大气圆锥面上的资料形成雷达图像[10].多普勒天气雷达在测量过程中得到的速度数据不是实际的风速,而是降水物质或者其他物体沿着雷达方向移动的径向速度[11-12].在讨论实际的天气情况时,通常利用实测的径向速度来分析、推测真实的风场结构.图 1 为实际雷达回波径向速度图像及相关数据.图像大小一般为 662 像素×512 像素,其中 512 像素×512 像素部分为径向速度图像区域,该区域在图像显示时加上了极坐标和地理背景信息,其他部分为雷达站名、雷达型号、观测时间、仰角(或方位角或高度)、量程范围以及色标等辅助数据.雷达图像中径向速度的大小是通过颜色变化表示的,一般暖色表示正径向速度,冷色表示负径向速度,具体速度值由色标索引.由逆风区的基本定义可知,正确识别正负速度区域是准确监测逆风区的关键所在.

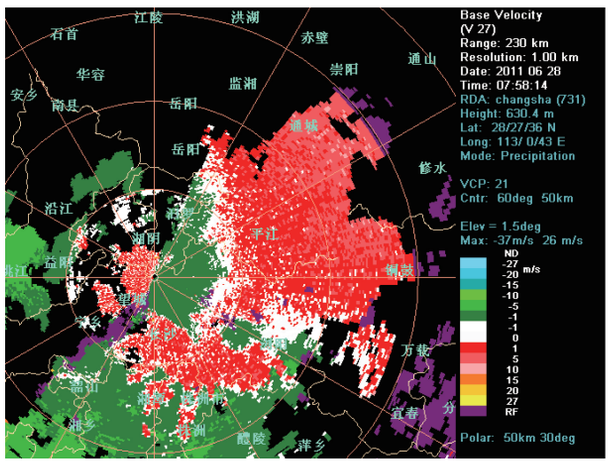


图 1 雷达回波径向速度图像及相关数据

Fig. 1 Radial velocity echo and relevant parameters

1.2 逆风区判据

逆风区一般在强对流风暴来临之前就已经存在,其出现的时刻都要比强降水天气提早 1~2 h,因此,逆风区的及时监测对强对流天气风暴的预报有着重要意义.根据多普勒雷达径向速度图像区域的特征分析可以将逆风区域的物理图像特征总结为:在同一方向速度场出现相反方向速度区,即正速度区中包含小区域的负速度区,或者是负速度区域包含小区域的正速度区,这些称之为逆风区[1].该逆风区与外围的速度场构成了幅合、幅散,气旋与反气旋结构.图 2 所示为逆风区示意,图中的黑实心圆代表多普勒雷达的位置.本文针对该逆风区研究并设计实现了自动监测识别方法.

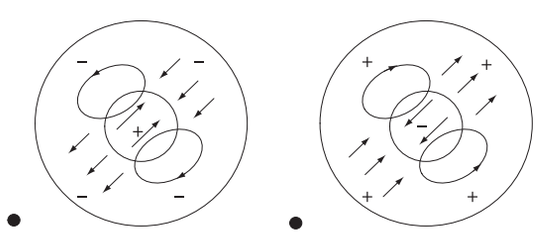


图 2 逆风区的 2 种情况

Fig. 2 The tow cases of adverse wind area

1.3 形态学运算

数学形态学的基本运算有 4 个:膨胀、腐蚀、开启、闭合.它们在二值图像和灰度图像中各有特点,基于这些基本运算还可以推导和组合成各种数学形态学实用算法[13].数学形态学中二值图像形态学变换是一种针对集合的处理过程,运算过程是在图像中移动一个结构元素,然后将结构元素与覆盖的二

值图像进行交、并等集合运算.

二值图像形态学的第一个基本运算是膨胀[14].膨胀是将与图像中目标接触的所有背景点合并到该目标中,使目标边界向外部扩张的过程,可以用来填补目标中的空洞.一般意义的膨胀概念定义为

$$D = X \oplus B = \left\{ (x,y) \,\middle|\, B_{xy} \cap X \neq \Phi \right\}, \quad (1)$$

即由 B 对 X 膨胀所产生的二值图像 D 是满足以下条件的点 (x,y) 的集合:如果 B 的原点平移到点 (x,y),那么它与 X 的交集非空.

二值图像形态学的第二个基本运算是腐蚀[14].腐蚀是一种消除边界点,使边界向内部收缩的过程,可以用来消除小且无意义的目标.一般意义的腐蚀概念定义为

$$E = X \otimes B = \{ (x,y) \mid B_{xy} \subseteq X \}, \quad (2)$$

即由 B 对 X 腐蚀所产生的二值图像 E 是满足以下条件的点 (x,y) 的集合:如果 B 的原点平移到点 (x,y),那么 B 将完全包含于 X 中.

本文提出的算法采用了腐蚀和膨胀运算的组合运算,用于去除径向速度图像上的极坐标与地理背景等噪声信息,以及对正负风场图像中孔洞的填充等.

2 逆风区自动识别方法

根据以上逆风区的定义,以及对多普勒雷达径向速度图像特征分析,本文设计了逆风区自动监测识别方法.主要思想为:以雷达图像色标为依据,采用图像阈值化方法分别获得正、负速度区域二值图像,再对 2 幅图像进行形态学运算,然后将以上 4 幅图像做交叉逻辑运算,得到逆风区监测识别结果及相关监测参数.完整算法流程如图 3 所示.

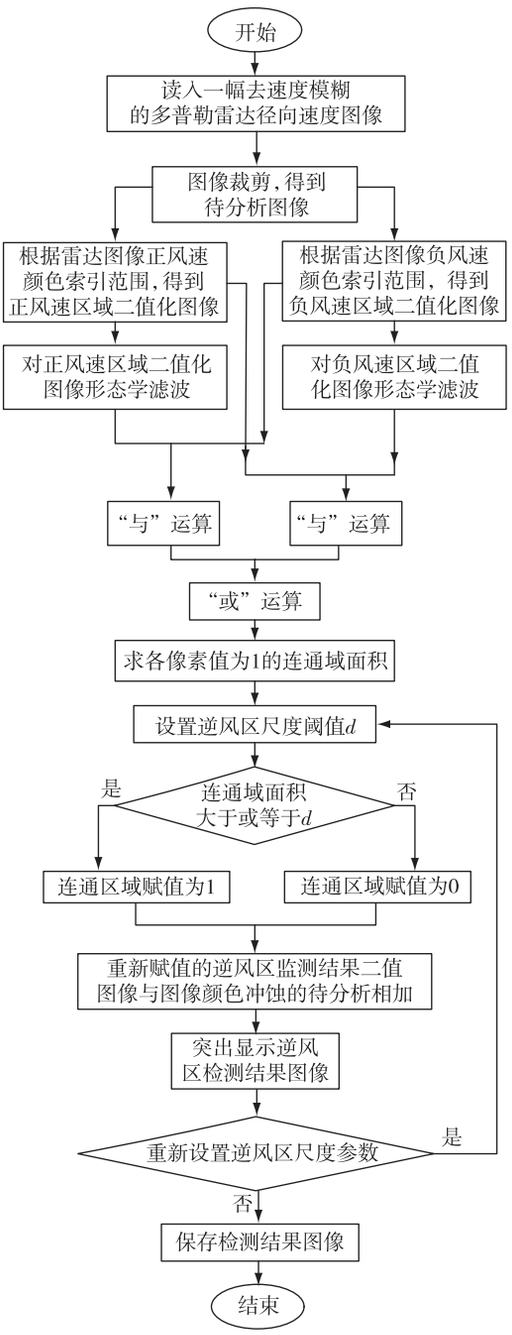


图 3 算法流程

Fig. 3 Algorithm flowchart of automatic recognition for adverse wind area

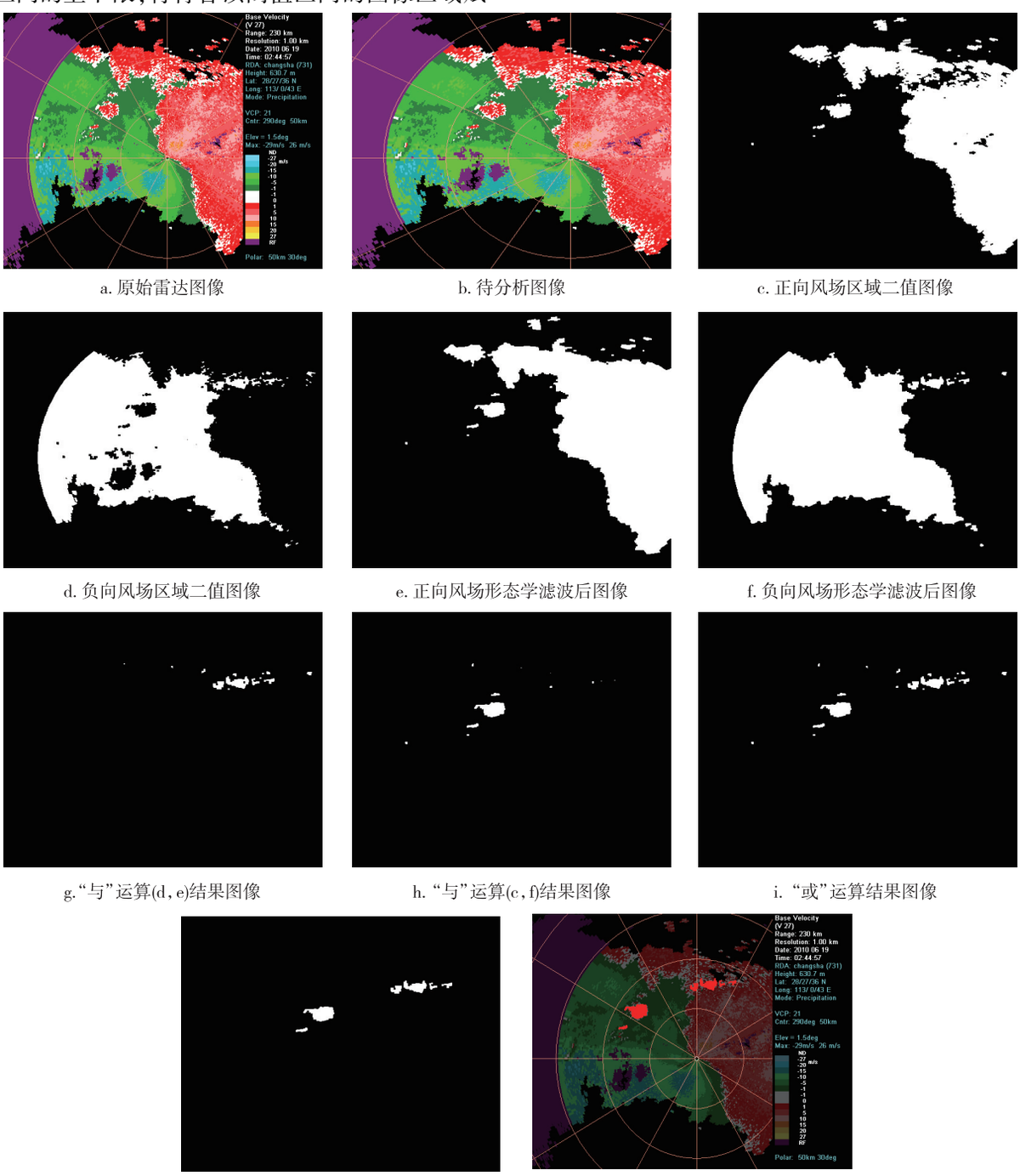
为详细描述实施过程,下面以一幅多普勒雷达图像逆风区监测识别为例,详细给出本文方法的各个步骤及结果.各个步骤图像处理和分析结果如图 4 所示.

1)待分析图像获取步骤.多普勒雷达径向速度图像大小一般为 662 像素×512 像素,其中 512 像素×512 像素部分为径向速度图像区域,该区域是分析逆风区的有效区域,但是,通常该区域在雷达图像显示时加上了极坐标线和地理背景等信息.因此,算法首先采用图像裁剪的方法,将原图像从左上角第一个像素开始,向右向下读取 512 像素×512 像素,得到的正方形区域即为存在逆风区的有效区域,获得的待分析图像为不包含任何标注信息的 512 像素×512 像素的待分析图像.图 4a 所示为原始雷达图像,图 4b 为不含标注信息的待分析图像.

2)正负风速区筛选步骤.根据逆风区的定义,自动识别逆风区的关键之一是确定多普勒雷达的正、负风场区域.由于每一种雷达图像的色标在获取图像时均为已知,本文将色标值记为 H_{PosIndex} 和 H_{NegIndex},分别表示正速度索引值和负速度索引值.本

方法利用色标的先验知识,采用双阈值法对待分析图像区域进行二值化运算.双阈值法二值化基本原理如式(3)、(4)所示,其中 $f(i,j)$ 表示原始图像,$I_{\mathrm{Pos}}(i,j)$ 表示正风速区二值图像,$I_{\mathrm{Neg}}(i,j)$ 表示负风速二值图像,i,j 表示图像中像素点的位置.首先,取色标所示正风速索引值的最大值和最小值作为双阈值区间的上下限,将符合该阈值区间的图像区域赋值为1,其余区域赋值为0,从而得到正向风场区域二值图像;然后,采用同样的方法得到负向风场区域二值图像.如图4c、4d所示.

$$I_{\mathrm{Neg}}(i,j)=\begin{cases}1, & \min(H_{\mathrm{NegIndex}})\leqslant f(i,j)\leqslant\max(H_{\mathrm{NegIndex}}),\\ 0, & \text{其他}.\end{cases} \tag{3}$$



a. 原始雷达图像　b. 待分析图像　c. 正向风场区域二值图像

d. 负向风场区域二值图像　e. 正向风场形态学滤波后图像　f. 负向风场形态学滤波后图像

g. “与”运算(d,e)结果图像　h. “与”运算(c,f)结果图像　i. “或”运算结果图像

j. 筛选后识别结果图像　k. 逆风区识别结果标注

图4　逆风区识别算法

Fig. 4　Recognition algorithm of adverse wind area in Doppler radar image

$$I_{\mathrm{Pos}}(i,j)=\begin{cases}1, & \min(H_{\mathrm{PosIndex}})\leqslant f(i,j)\leqslant\max(H_{\mathrm{PosIndex}}),\\ 0, & \text{其他}.\end{cases} \quad (4)$$

3)形态学滤波步骤.由被监测逆风区结构的特殊性可知,逆风区为正向风场区域中包含负向风场区域,或者负向风场区域中包含正向风场区域,这2种情况均为需要监测的逆风区区域.因此,本算法分别对正向风场区域二值图像和负向风场区域二值图像进行形态学滤波运算,具体为先开运算(OPEN)再闭运算(CLOSE),分别如式(5)、(6)所示.先腐蚀后膨胀的过程称为开运算,主要用来消除小目标、在纤细点处分离目标、平滑较大目标边界的同时并不明显改变其面积;先膨胀后腐蚀的过程称为闭运算,主要用来填充目标内细小空洞、连接邻近目标、平滑其边界的同时也不明显改变其面积.通过以上形态学组合滤波过程,可以将雷达二值图像中较纤细的区域腐蚀去除,较大区域的边界得到平滑,图像中细小空洞被填充,彼此邻近区域被连接起来.如图4e、4f所示.将滤波后的正向风场区域二值图像记为$I'_{\mathrm{Pos}}(i,j)$和负向风场区域二值图像$I'_{\mathrm{Neg}}(i,j)$.

$$\mathrm{OPEN}(X,B)=X_B=X\circ B=(X\otimes B)\oplus B, \quad (5)$$

$$\mathrm{CLOSE}(X,B)=X_B=X\cdot B=(X\oplus B)\otimes B. \quad (6)$$

4)交叉逻辑运算步骤.交叉逻辑运算是本算法的关键步骤,将填充后的正向风场区域二值图像$I'_{\mathrm{Pos}}(i,j)$和未填充的负向风场区域二值图像$I_{\mathrm{Neg}}(i,j)$进行逻辑"与"运算,得到以负速度为中心的逆风区二值图像,将填充后的负向风场区域二值图像$I'_{\mathrm{Neg}}(i,j)$和未填充的正向风场区域二值图$I_{\mathrm{Pos}}(i,j)$像进行逻辑"与"运算,得到正速度为中心的逆风区二值图像,然后将上述获得的2幅图像进行逻辑"或"运算,即得到逆风区区域监测结果二值图像.运算表达如式(7)所示.该步骤的最大优势是可以将待分析图像中第一类逆风区的2种情况同时提取出来.本步骤的示例如图4g—4j所示.

$$I_{\mathrm{AWA}}=[I'_{\mathrm{Pos}}(i,j)\text{ 和 }I_{\mathrm{Neg}}(i,j)]\text{ 或 }[I'_{\mathrm{Neg}}(i,j)\text{ 和 }I_{\mathrm{Pos}}(i,j)]. \quad (7)$$

5)逆风区影响面积计算步骤.由于不同仰角的多普勒雷达观测逆风区的尺度有一定的范围限制,本方法在监测识别逆风区区域之后,采用计算像素数法计算识别出的各个逆风区影响面积.根据计算结果,可筛选某一尺度范围内的逆风区进行分析研究.如图4k所示为尺度大于50像素的逆风区.

3 实验及讨论

本文使用2005—2011年长沙雷达站47幅多普勒雷达图像(其中含逆风区图像45幅,无逆风区图像2幅),图像分辨率为1.00 km,雷达仰角包括有0.5°、1.5°、2.4°、6.0°进行实验,部分实验结果如图4所示.将全部实验结果与气象专家人工分析结果进行比对,本算法对逆风区发生位置的监测识别结果准确率可以达到89%,漏检率为4.2%,错误率为6.3%.漏检的主要原因是:从雷达图像上看,在逆风区不完全闭合的情况下,本算法视为非逆风区,但人工监测认为是第一类逆风区,这种情况将其归为漏检.经分析,这些漏检可能与算法中相关阈值设置的单一有关.实验结果表明,本算法具有快速准确监测识别逆风区的能力.今后,可以对本算法中的阈值设置做自适应调整研究,使得算法结果更加符合人工判别结论,以进一步提高逆风区的监测准确率.

4 结论

本文基于图像处理和分析技术,通过详细分析雷达逆风区物理图像特征,提出了逆风区自动监测识别方法.实验结果与人工判别结果进行比较后发现,本方法对多普勒雷达图像逆风区自动监测具有较高的可靠性,较低的漏检率和误检率,为早期逆风区的自动发现和监测识别工作提供了基础技术支持,对实现多普勒雷达图像逆风区自动识别具有重要意义和实用价值.

参考文献

References

[1] 张沛源,陈荣林.多普勒速度图上的暴雨判据研究[J].应用气象学报,1995,6(3):373-377
ZHANG Peiyuan, CHEN Ronglin. Study on rainstorm criterion of Doppler radar velocity images[J]. Quarterly Journal of Applied Meteorology, 1995, 6(3): 373-377

[2] 蔡晓云,焦热光.多普勒速度图暴雨判据和短时预报工具研究[J].气象,2001,27(7):13-15
CAI Xiaoyun, JIAO Reguang. On heavy rain signature recognition by radar velocity images and a nowcasting utility[J]. Meteorological Monthly, 2001, 27(7): 13-15

[3] 张沛源,杨洪平,胡绍萍.新一代天气雷达在临近预报和灾害性天气警报中的应用[J].气象,2008,34(1):3-11
ZHANG Peiyuan, YANG Hongping, HU Shaoping. Applications of new generation weather radar to nowcasting and warning of severe weather[J]. Meteorological Monthly, 2008, 34(1): 3-11

[4] 陈鲍发,魏鸣,柳守煜.逆风区的回波演变与强对流天气的结构分析[J].暴雨灾害,2008,27(2):127-134
CHEN Baofa, WEI Ming, LIU Shouyu. The echo evolution of adverse wind area and the structure of the strong convection weather[J]. Torrential Rain and Disasters, 2008,

27(2):127-134
[5] De Wayne M E,Vasiloff S V,Stumpf G J,et al.The national severe storms laboratory tornado detection algorithm[J]. Weatherand Forecasting, 1998, 13(2): 352-366
[6] Dellecker R.Boundary-scan bursts into the modern production facility[J].IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine,2001,16(6):21-24
[7] 胡大海.基于多普勒雷达径向速度图的风暴信息提取[D].天津:天津大学电气与自动化工程学院,2010
HU Dahai. Extraction of storm information on radial velocity map of Doppler radar[D]. Tianjin: School of Electrical Engineering & Automation, Tianjin University,2010
[8] 张春.基于多普勒雷达图像的中气旋识别[D].天津:天津大学电气与自动化工程学院,2005
ZHANG Chun.Mesocyclone recognition based on Doppler radar image[D].Tianjin:School of Electrical Engineering & Automation,Tianjin University,2005
[9] 李重阳.多普勒气象雷达图像逆风区的检测与识别[D].西安:西安电子科技大学计算机学院,2009
LI Chongyang. Detection and identifieation of backwind zone image of Doppler weather radar[D]. Xi'an: Computer School,Xidian University,2009
[10] 胡明宝,高太长,汤达章.多普勒天气雷达资料分析与应用[M].北京:解放军出版社,2000
HU Mingbao, GAO Taichang, TANG Dazhang. Doppler weather radar data analysis and application[M].Beijing: Publishing House of People's Liberation Army,2000
[11] 李军霞,汤达章,李培仁,等.中小尺度的多普勒径向速度场特征分析[J].气象科学,2007,27(5):557-563
LI Junxia, TANG Dazhang, LI Peiren, et al. Analysis of meso and small scale Doppler velocity features[J]. Scientia Meteorologica Sinica,2007,27(5):557-563
[12] 杜秉玉,陈钟荣,张卫青.梅雨锋暴雨的 Doppler 雷达观测研究:中尺度对流回波系统的结构和特征[J].南京气象学院学报,1999,22(1):47-55
DU Bingyu,CHEN Zhongrong,ZHANG Weiqing.A study of meiyu front storm with Doppler radar observations: Structure and features of a mesoscale convective echo system[J].Journal of Nanjing Institute of Meteorology, 1999,22(1):47-55
[13] Gonzalez R C,Woods R E.数字图像处理[M].2 版.阮秋琦,阮宇智,等译.北京:电子工业出版社,2003
Gonzalez R C,Woods R E.Digital image processing[M]. 2nd Ed.Translated by RUAN Qiuqi,RUAN Yuzhi,et al. Beijing:Publishing House of Electronics Industry,2003
[14] Sonka M,Hlavac V,Boyle R.图像处理、分析与机器视觉[M].艾海舟,武勃,等译.北京:人民邮电出版社,2003
Sonka M,Hlavac V,Boyle R.Image processing,analysis and machine vision[M].Translated by AI Haizhou,WU Bo,et al.Beijing:Posts & Telecom Press,2003

Automatic monitoring and recognition of adverse wind area in Doppler radar velocity images

ZHAO Liling[1,2] WU Yi[1,2] LIU Qingshan[1,2] YIN Zhonghai[3]
1 School of Information and Control,Nanjing University of Information Science & Technology,Nanjing 210044
2 Jiangsu Key Laboratory of Big Data Analysis Technology,Nanjing 210044
3 Hunan Meteorological Observatory,Changsha 410118

Abstract Accurate monitoring on adverse wind areafrom Doppler radar images is of great significance in the fast and automatic warning system of severe weather.In this paper,an in-depth study on the structural features of adverse wind area of Doppler radar radial velocity image iscarried out,then an accurate and automatic monitoring algorithm is designed and implemented which runs as follows.Firstly,the Doppler radar radial velocity color image is processed into two binary images,namely the positive speed binary image and the negative speed binary image,based on the color bar.Secondly,the two binary images are operated by morphology for de-noising.After that,the above four images are operated together by cross logic and the monitoring result with some related parameters are obtained accurately.In order to show the effectiveness of this algorithm,forty-seven Doppler radar radial velocity images include one or more adverse wind areas,from Changsha Radar Station of Hunan province,are tested.All experiments present an exciting result that the proposed algorithm can be 89% in accuracy,which is extremely effective for practical application.

Key words Radar images;adverse wind area;morphological operations;logical operation