

8-5-2020

Identification and Visual Analysis of Structure Characteristics of Severe Storm

Jiayi Xu

1. Department of Computer Science, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China; ;

Xuanxuan Huang

2. Ningbo Meteorology Bureau, Ningbo 315012, China;

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Identification and Visual Analysis of Structure Characteristics of Severe Storm

Abstract

Abstract: A technique of adaptively extracting the feature regions from radar storm data was proposed based on the meteorological radar theory and historical statistics. A logical analysis strategy was proposed to identify convective cores, searched full convective regions to extract isolated storm cells. *The changing of reflectivity data and corresponding gradient were analyzed to classify four typical structures. In order to accurately show the extracted spatial structures of storm cell, a parallel rendering framework was constructed by improving the ray-casting algorithm.* Experiment results show that the proposed technique can quickly and accurately identify and visualize the spatial structure of severe storm, help forecaster to grasp the features and evolution of severe storm, and monitor and forecast disastrous weather effectively.

Keywords

severe storm, adaptive identification, structure characteristic, volume rendering

Recommended Citation

Xu Jiayi, Huang Xuanxuan. Identification and Visual Analysis of Structure Characteristics of Severe Storm[J]. Journal of System Simulation, 2015, 27(11): 2701-2713.

强风暴结构特征的识别与可视辅助分析

许佳奕¹, 黄旋旋²

(1. 杭州电子科技大学计算机学院, 杭州 310018; 2. 宁波市气象局, 宁波 315012)

摘要: 基于雷达气象理论和历史统计, 提出一种能从雷达数据中自适应地分割出强风暴体内多类重要特征区域的算法。以逻辑分析策略识别对流系统内核点, 搜寻连通区域完成风暴单体分割; 分析连通对流区域中反射率强度和梯度分布的特点, 自动地抽取强风暴体中 4 类特征区域的边界阈值; 针对雷达数据特点改进传统的光线投射算法, 其能够自动调节绘制参数, 加强显示风暴体内部重要结构。实验结果表明: 算法能准确而快速地识别出具有特征结构的区域边界, 辅助气象预报员快速掌握强风暴的属性和发展状况, 进而更有效的对灾害天气进行监测和预报。

关键词: 强风暴; 自适应识别; 结构特征; 体绘制

中图分类号: TP391.9 文献标识码: A 文章编号: 1004-731X (2015) 11-2701-13

Identification and Visual Analysis of Structure Characteristics of Severe Storm

Xu Jiayi¹, Huang Xuanxuan²

(1. Department of Computer Science, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China; 2. Ningbo Meteorology Bureau, Ningbo 315012, China)

Abstract: A technique of adaptively extracting the feature regions from radar storm data was proposed based on the meteorological radar theory and historical statistics. A logical analysis strategy was proposed to identify convective cores, searched full convective regions to extract isolated storm cells. *The changing of reflectivity data and corresponding gradient were analyzed to classify four typical structures. In order to accurately show the extracted spatial structures of storm cell, a parallel rendering framework was constructed by improving the ray-casting algorithm.* Experiment results show that the proposed technique can quickly and accurately identify and visualize the spatial structure of severe storm, help forecaster to grasp the features and evolution of severe storm, and monitor and forecast disastrous weather effectively.

Keywords: severe storm; adaptive identification; structure characteristic; volume rendering

引言

强对流天气(包括雷电、冰雹、雷雨、大风等现象), 也称强风暴, 是大气对流活动强烈发展而产生的灾害性天气, 发生时会造成巨大的社会危

害。由于强风暴空间尺度较小、持续时间较短, 运用常规观测手段难以对其进行有效监测。目前, 具有高时空分辨率的多普勒天气雷达是强风暴的主要遥感监测手段之一。通过分析雷达数据可以监测风暴的三维空间结构^[1]。因此, 研究如何对多普勒雷达采集的数据进行自动分析, 准确而快速地识别出各种类型强风暴内部结构的边界, 借助可视化的技术清晰的展示这些强风暴的空间结构, 从而辅助预报员更好地识别出强风暴体的特征, 对其进行监测和预警具有重大的社会和经济意义。



收稿日期: 2014-08-15 修回日期: 2014-09-16;
基金项目: 浙江省自然科学基金(Q12F020007); 浙江省教育厅科研项目(Y201121352); 国防基础科研重点项目(A3920110002);
作者简介: 许佳奕(1983-), 女, 浙江, 博士, 讲师, 研究方向为计算机动画、实时绘制、GPU 并行编程、纹理设计。

<http://www.china-simulation.com>

• 2701 •

大量的气象观测试验表明,强风暴体内的含水量的空间分布复杂,发展旺盛的对流云中常有多极大值中心,最大数值中心未必位于云中心,有时候在云的边缘含水量可能急剧增加到很大。多普勒探测原理表明,多普勒雷达可以监测到强风暴的高密度雨滴时空分布信息。不同大小的雨滴后向散射截面不一,对应于雷达探测到反射率强度数值上的不同。如果能够从强风暴内部反射率梯度变化较大的区域中自动地计算出合适的阈值,就能很好地区分风暴体内的强降水和弱降水区域。除了降水,对于冰雹而言,由于冰雹粒子和降水粒子的物理属性不同,冰雹体相对应的雷达反射率数据存在显著的梯度变化,因此根据合适的边界阈值也可以从强风暴体内区分出冰雹的结构分布。

多年来,国内外开展了多项研究从多普勒雷达采集到的数据中区分层云和对流云,识别出对流云后,进一步分析对流云的强度,找到对流云区域中的各类强风暴体。但是,已有的算法往往根据预报员的经验来指定一个或者几个固定的阈值用于分类。强风暴体具有内部结构复杂多变的特点,预先设定的阈值很难普遍适用于各种类型的强风暴。因此,如何自适应地识别出强风暴的多种属性,以及如何基于重要属性正确地描述强风暴体内部的显著结构特征是有待解决的关键问题。

此外,目前针对对流云的识别方法大都给出的是二维的分析结果,并未给出强风暴的立体结构信息。由于气象系统是一个三维分布的时空动态过程,仅仅使用二维图像(例如 PPI 或者 CAPPI)的显示方法,预报员难以有效地通过观察数据分析出强风暴的复杂空间结构和演变状况^[2]。在实际应用中,特征结构的准确识别需要依靠于气象预报员对二维和三维的分析结果进行综合分析。例如,从二维的风暴剖面中气象预报员可以观测到强反射率数值(往往对应灾害性天气)的区域分布,但是无法直接判断出内核区域存在的是暴雨还是冰雹。因此,如何根据多普勒雷达数据的空间分布特点,将强风暴识别结果直接快速地三维可视化,更为直观和全

面地展现强风暴内部的空间结构,从而有效地辅助预报员进行观察和预测,也是一个急需解决的问题。

本文以多普勒雷达数据为分析对象,通过对历史数据的规律进行归纳总结,提出基于逻辑归纳的算法用于识别对流系统中强风暴的单体区域;然后动态地分析上述识别出的连通对流区域中雷达反射率数据和其梯度的变化规律,自动地抽取出区域中强风暴体内 4 类典型结构的边界。根据计算得到的强风暴边界阈值 T_{cov} ,可确定强风暴体的区域范围;根据计算得到的强风暴内核区域边界阈值 T_{incov} ,可确定强风暴内核区域的范围,在此基础上以三维绘制的方式呈现结果,气象预报员能够观测出是否存在回波悬垂,有界弱回波区域等重要结构;根据计算得到的强风暴暴雨内核区域的边界阈值 $T_{heavyrain}$,可以对短时强降水进行判断;根据计算强风暴冰雹区域的边界阈值 T_{hail} ,可以对冰雹结构进行判断。

在结果显示方面,本文改进了传统的光线投射算法,构建了一个在 GPU 上高效计算的体绘制框架,能够清晰地对强风暴体内部的立体结构进行实时展示。实验结果显示,本文算法能从立体角度对强风暴结构进行清晰地展示,辅助预报员快速地观测出强风暴的性质和演变发展情况,为强风暴的短时临近预报提供重要的技术支持。

1 相关工作

以多普勒雷达探测到的数据为分析对象,气象学领域进行了很多关于层云和对流云分类,以及风暴体识别的研究^[3]。早期的风暴识别算法^[4]将反射率阈值定为 30 dBZ,对流区域中超过该阈值的区域被划分为风暴单体。这种简单的分类造成大于 30 dBZ 的广大区域如鹰线,中尺度对流复合体和热带风暴等都被识别为一个单体,对小间隔的风暴群的识别效果并不理想。Houze^[5], Churchill 等人^[6]提出了一些基于降雨场水平结构来区分层云和对流云的方法。Steiner 等人^[7]进一步发展了这些分类技术,将对流中心区域的识别条件修改为: 1)任何

反射率强度超过 40 dBZ 的格点被识别为对流中心区域点; 2)任何反射率超过周围区域的平均密度, 并且达到某一阈值的格点, 被识别为对流中心。当识别出一个对流中心后, 其周围一个密度影响半径内的其他格点都将被归类为该对流中心区域。Shusse 等人^[8]基于文献[7]的理论, 提出需要在峰值和雷达站参考高度这两个部分修改判断条件。上述方法都仅仅基于等高面反射率数据对对流云进行分类识别。Biggerstaff 等人^[9]指出文献[6]算法会错误地将对流中心外围识别为层状云降水, 将较强的层状云降水识别为对流性降水。因此, Biggerstaff 等人采用文献[6]算法进行降水初步分类后, 综合反射率垂直递减率和反射率水平梯度数据, 对结果进行修正。Johnson 等人^[10]提出 SCIT 算法, 通过设定 7 个不同的阈值, 首先识别风暴单体段, 然后识别出风暴单体分量, 最后识别出风暴单体信息。该算法充分利用了雷达多层仰角的扫描信息, 能够更准确地识别强风暴, 对于孤立强风暴的单体识别率要高于其他类型(MCS, 飚线等)。Zhang 等人^[11]提出下述 2 个条件来区分层云和对流降水云: 在垂直方向上, 任何高度的反射率强度都大于 50 dBZ 的格点; 或者在 -10°C 高度层反射率强度超过 30 dBZ 的格点, 均被识别为对流区域点。该分类策略适用于大部分个例, 但是有时候容易把层云的零度层亮带误识别为对流云区域点。Zhang 等人^[12]在后续的研究中通过经验总结, 提出使用垂直液态水含量 $VIL = 6.5 \text{ kg/m}^2$ 做为区分阈值。该方法降低了将层云误识别为对流云的可能, 但是有时会将对流云内核区域外部的区域误识别为层云, 并且雷达反射率数据可能对 VIL 值存在低估。为了解决上述问题, Zhang 等人^[13-14]结合了文献[7,11-12]的算法, 与美国国家强风暴实验室联合研究开发出全国拼图和多途径定量降水估算系统, 能较好地应用于单体雷达数据。韩雷等人^[15]从数学形态学的角度出发, 以一种多阈值识别结合基于动态卷积模板的膨胀和腐蚀操作的方法识别三维风暴体。算法解决了风暴体的虚假合并的识别问题, 同时尽可能多地保留从

风暴簇中分离出的风暴单体的内部结构信息。

风暴是在三维时空中快速发展的结构体, 以上各种识别方法大都只能在二维层面上识别风暴区域, 无法对风暴各类属性的立体结构特征进行识别, 无法帮助预报员直观地了解风暴的三维结构信息。

认识到气象数据的三维可视化在辅助分析和预报方面的重要应用, 国内外各公司和研究院所开发了多种气象数据的可视化系统。Hibbard^[16]主持开发的 McIDAS 系统可以三维的方式显示动态的气象数据。NOAA 基于 Vis5D 开发了 D3D^[17]气象数据显示系统。结合计算机动画与可视化技术开发的 AniViz^[18]系统, 可展现多种类型的体数据。以气象数据为输入, 可以通过调节参数的方式来绘制龙卷过程。大气环境研究所、北京大学的学者基于 Vis5D 开发了气象可视化系统 PC-Vis5D^[19-20]。国防科技大学开发出气象可视化原系统^[21]。中科院基于 AVS/Express 平台开发了气象模式三维可视化系统^[22]。何全军等人^[23]利用 IDL 语言实现气象数据的可视化。华北计算所基于 osg 平台开发了五维气象数据的可视化软件^[24]。中国气象科学研究院将三维可视化技术运用于显示雷达三维回波数据^[25]。侯焕等人^[26]基于开源的 VTK 工具库进行二次开发后用于雷达图像的可视化。比较近年来开发的多款显示系统(图 1~4 所示)发现, GR2analyst 软件^[27]能较为清晰地显示强风暴数据。该软件以新一代天气雷达 2 级、3 级数据做为输入, 能够以高质量的半透明效果展现三维风暴的结构。但是, 使用时透明度的设置需要用户凭借经验进行手工调节, 不仅操作略为繁琐, 而且显示效果受到参数调节的影响。

将计算机图形学领域的可视化技术应用于气象领域, 能够实现以直观的形式展示气象数据。Upson 和 Keeler^[28]采用体绘制技术显示不规则的大气数据场。Joshi 等人^[29]结合了计算机与气象学科的知识, 借助插图启发的可视化方法来帮助理解龙卷风的内部结构和发展过程。Tikhonova 等人^[30]以一种探索的方法调节传输函数, 将其用于绘制随时

空变化的体数据。实验结果表明，该方法能增强流场、燃烧等过程的绘制效果。屠文洁^[31]研究了基于二维分布图设计传输函数的方法和基于机器学习的方法，用体绘制算法绘制气象数据。高希伟^[32]以龙卷风体数据为研究对象，利用“熵”概念度量气象数据的重要性，根据重要性进行 k-means 聚类，实现数据分类的突出绘制。

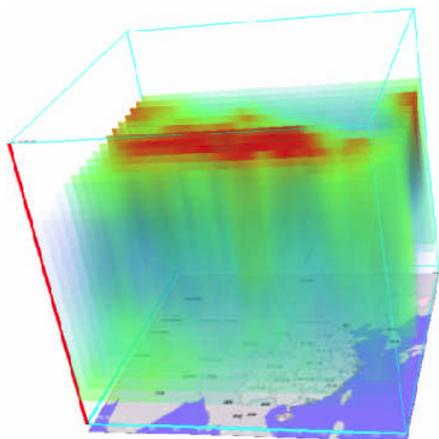


图 1 文献[24]绘制的温度体

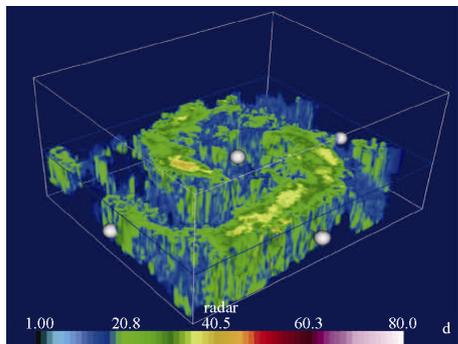


图 2 文献[25]绘制的中心回波

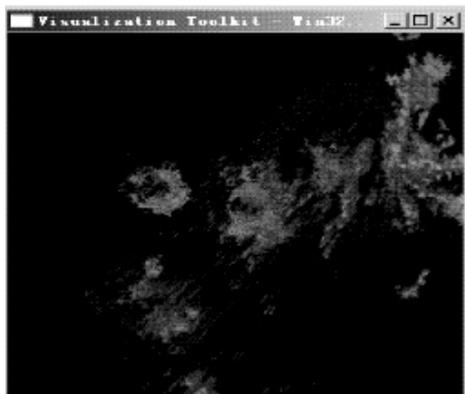


图 3 文献[26]绘制的雷达图像

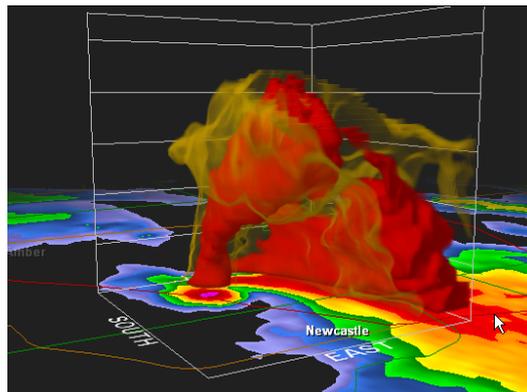


图 4 文献[27]绘制的雷达回波

2 强风暴结构特征的自适应识别

依据造成的灾害和影响，强风暴可以分为短时强降水、雷雨大风、冰雹等类型。本文提出的强风暴结构特征识别算法主要是针对上述类型进行自适应地识别和分析。算法主要流程如图 5 所示。

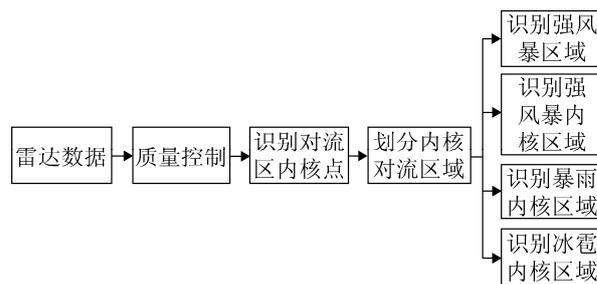


图 5 强风暴内部结构特征的识别流程

由于层云的零度层亮带是由于冰粒融化而形成局部偏强的反射率强度数据^[33]，对流云中强风暴体的结构分析算法必须限制在对流区内进行，否则可能因受到层云区域内零度层亮带的污染影响而导致分析结果不准确。为了自动达到区分出对流区域中的强风暴体多种属性的目的，首先基于逻辑分析的策略从雷达数据中识别出对流区内核；然后基于种子填充的思想搜索所有识别出的对流区内核点，合并连通的对流区内核点以寻找到连通的对流区域，完成对所有独立对流区域的分割；最后，从每个对流区域中的反射率强度数据及梯度数据的分布规律中分析识别出强风暴体的结构特征信息。

2.1 雷达数据的质量控制

对多普勒雷达采集的数据首先用自适应的参考切面算法^[34]进行质量控制, 然后将处理后的各层二维数据内插到统一的笛卡尔坐标系统下, 采用垂直水平插值和相邻数据就近取值^[35]的插值方法生成高精度的三维均匀网格数据。

2.2 对流区内核点识别

根据历史数据的统计和预报员经验总结, 将数据按雷达范围半径分为 0~25 km, 25~250 km 以及超过 250 km 半径 3 类区域, 分区域采用如下逻辑分析策略识别对流区内核点:

1) 对 25 km 半径范围内的雷达数据格点, 计算在 1.3 km 高度以下的最大反射率数据。如果最大反射率数据最大超过 45 dBZ 且零度层的高度高于 2 km 高度, 判定该格点为对流区内核点。

2) 对超过 250 km 半径范围区域的雷达数据格点, 如果在其最底层的等仰角面有部分格点数据穿过-10 °C 温度层高度 (例如在-10 °C 高度附近检测到了该层的数据), 并且反射率数据大于等于 35 dBZ, 判定为对流区内核点。

3) 对 25~250 km 半径范围内区域的数据格点, 计算垂直液态水含量(VIL)来判断其是否为对流区内核点:

$$VIL = \sum_{k=1}^{k_{top}} VIL_{part_k} \quad (1)$$

其中, $VIL_{part_k} = LW \cdot DB$ 是第 k 层等仰角面的 VIL。 LW 和 DB 按照公式(2)~(3)计算:

$$LW = 3.44 \times 10^3 ZE^{4/7} \quad (2)$$

$$DB = \begin{cases} BH(\theta_{k_{top}} + \frac{BW}{2} - \frac{\theta_{k_{top}} + \theta_{k_{top}-1}}{2}) & k = k_{top} \\ BH(\frac{\theta_{k+1} + \theta_k}{2} - \frac{\theta_k + \theta_{k-1}}{2}) & 1 < k < k_{top} \\ BH(\frac{\theta_1 + \theta_2}{2}) & k = 1 \end{cases} \quad (3)$$

其中: LW 是液态水常数 (kg/km^3); DB 是雷达波速随距离的探测深度; ZE 是有效反射率因子

(mm^6/m^3); BH 是在标准大气条件下的波速射线随距离变化的高度; θ_k 是第 k 层等仰角面的仰角角度。

a) 如果 $VIL < 6.5 kg/m^2$, 判定该格点不是对流区内核点。

b) 如果 $VIL \geq 6.5 kg/m^2$, 进一步判断:

- 如果在-10 °C 层高度的反射率低于 30 dBZ, 判定该点不是对流区内核点;

- 如果反射率在-10 °C 层高度的数值大于等于 30 dBZ, 并且反射率在 0 °C 层高度的数值低于 45 dBZ, 判定该点是对流区内核点;

- 如果反射率在-10 °C 层高度的数值 ≥ 30 dBZ, 并且反射率在 0 °C 层高度数值 ≥ 45 dBZ, 并且第一层仰角层数据上面高于-10 °C 层高度的反射率数值 ≥ 30 dBZ, 判定该点是对流区内核点。

2.3 内核对流区域的划分

雷达数据中存在多个独立的对流区域。基于种子填充的思想搜索所有识别出的对流区内核点, 合并连通的对流区内核点以寻找到连通的对流区域, 完成对流区域的分割。具体的搜索算法如下所示:

1) 寻找到一个不属于任何对流区域的对流内核点, 将其视作为起始种子点。从种子点出发搜索相邻的格点, 如果相邻点也是对流内核点, 则将其归为同一个对流区域并视作为新的种子点。通过不断的递归搜索合并同一连通区域内的对流内核点, 完成该对流区域的识别。

2) 重复以上过程, 直到所有对流区内核点被归于某一对流区域为止。

3) 如果找到的对流区域内部有少量数据格点被归类为非对流区内核点, 修正为对流区内核点。

2.4 特征区域的自适应提取

分割出风暴体内一个或者多个独立对流区域后, 计算合适的边界阈值就能够从每个对流区域中识别出强风暴体的各类内部结构。目前本文主要针对强风暴体内部的短时强降水、冰雹等类型的属性进行提取。

多普勒探测原理表明,在符合瑞利散射的条件下,粒子的后向散射截面约大,则返回的能量越大,进而获得反射率强度数值也越大。因此,通常来说,短时强降水,雷雨大风中大雨滴对应更大的反射率强度数值。雨滴通过凝结和碰并方式获得增长,强风暴中的上升气流能加速这个过程。虽然雨滴的最大直径理论上可达 5 mm 左右,但是在自然界降水中,水滴直径一般很少大于 2~3 mm。主要原因是大雨滴易受碰撞破裂和形变破裂的影响,从而破碎成为新的小雨滴。因此,强风暴体内的暴雨区域较为可能具有以下显著的特征:1)如果该区域的大雨滴易发生破碎,则暴雨内核区域的水平反射率的梯度变化会呈现出增大的趋势;2)如果该区域的雨滴大小在一定条件下一直维持,则暴雨内核区域的水平反射率的梯度变化会一定程度上呈现出减小的趋势。对于冰雹而言,由于冰雹粒子和降水粒子的物理属性不同,对于相同体积的冰雹粒子和降水粒子,探测到的雷达反射率强度不同。大量的统计结果显示,大冰雹粒子的雷达截面能够达到同体积水球的 10 倍,因此,大冰雹时探测到的雷达回波特别强。冰雹粒子受到相同大气环境(温度湿度,垂直气流等)的影响发展壮大,可以认为在同一个监测时间内,冰雹密集区域边界上具有水平的反射率强度梯度变化增强的特征,而在内部的大部分区域所探测到的水平的反射率强度梯度变化相对较小。根据经验,强风暴体的内核一般存在于反射率强度大于 35 dBZ 的区域,当反射率强度达到 55~60 dBZ 时有很大概率出现冰雹。

基于上述雷达气象学分析与规律总结,计算强风暴区域内的水平的反射率梯度分布,依据梯度的变化特点可以自适应地抽取对应强风暴的属性及结构特征的边界。算法的具体实现过程如下所示:

1) 计算平均反射率梯度值的分布曲线

遍历对流区域中的所有格点 P_i ,以离散差分的形式计算其反射率强度 R_i 的梯度值 G_i 。对于任一反射率强度处于 $r \in [25, 60]$ dBZ 的 r ,找到对流区域中所有对应的格点,计算这些格点对应梯度的平

均值,建立平均梯度值分布的曲线 $G(r)$ 。

2) 计算强风暴区域边界阈值 T_{cov} ,确定强风暴体的内边界

根据经验,对流云的边界处反射率水平梯度最大,而在内部梯度变化相对较小。计算平均梯度随着反射率强度的变化 G_d ,衡量局部范围内梯度变化的显著性。找到平均梯度分布曲线 $G(r)$ 上的最大值 $G(r_p)$ 和最小值 $G(r_v)$,计算 $G(r)$ 的平均递减率 G_a 。

$$G_d = \frac{\sum_{r=25}^{r=60} \text{abs}(G(r) - G(r-1))}{36} \quad (4)$$

$$G(r_p) = \max(G(r)), r \in [25, 45] \quad (5)$$

$$G(r_v) = \min(G(r)), r \in [35, 55] \quad (6)$$

$$G_a = (G(r_p) - G(r_v)) / (r_p - r_v) \quad (7)$$

对流云的边界一般在 30~35 dBZ 范围,计算 $G(r_p)$ 时反射率强度 r 取值范围 $r \in [25, 45]$ dBZ。对流内部反射率强度变化较小的区域一般是风暴的内核区域,该区域反射率强度一般大于 40 dBZ,计算 $G(r_v)$ 时反射率强度 r 取值范围 $r \in [35, 55]$ dBZ。

遍历反射率强度 $r \in [30, 38]$ dBZ 的格点,计算 $B(r, s)$ 和 $S(r, s)$:

$$B(r, s) = (G(r) - G(r-s)) > G_d \ \& \ (G(r) - G(r+s)) > G_d \quad (8)$$

$$S(r, s) = (G(r) - G(r+s)) > s \times G_a \quad (9)$$

因为发展旺盛的强对流风暴具有边界较窄的特点。如果 s 取值跨度过大,会因为取值平均过滤掉特征,而 s 取值太小,会导致结果不稳定。经过试验,目前取 $s=1, 2, 3$ 计算 r 邻域的 $B(r, s)$ 和 $S(r, s)$ 。如果 $B(r, 1) \ \& \ B(r, 2) \ \& \ B(r, 3)$ 为真,则当前反射率强度 r 对应的格点具有局部峰值特征;如果 $S(r, 1) \ \& \ S(r, 2) \ \& \ S(r, 3)$ 为真,则当前反射率强度 r 对应的格点具有右侧显著递减特征。

当格点具有局部峰值特征或者右侧显著递减特征时,该格点就属于强风暴对流区域的边界。找到所有该类格点对应的反射率强度值 r ,统计其中出现次数最多的反射率强度 r 就是该强风暴对流区

域边界的阈值 T_{cov} 。

3) 计算强风暴内核区域边界阈值 T_{incov} ，确定强风暴内核区域的内边界

强风暴对流内核区域边界处于强风暴对流区域的内部，该区域的正确识别对于分析强风暴的内部结构具有非常重要的意义。该区域边界阈值的计算方法与对流区域边界的阈值计算方法(公式 8, 9) 相同。区别为该处遍历的是反射率强度 $r \in [40, 48]$ dBZ 的区域，计算 $B(r, 1) \& B(r, 2) \& B(r, 3)$ 和 $S(r, 1) \& S(r, 2) \& S(r, 3)$ 。如果计算出的内核区域边界阈值 T_{incov} 满足 $abs(G(T_{incov}) - G(T_{cov})) < G_d$ 时，说明该强对流的边界上水平梯度很大，对流区域的边界和对流内核的边界非常靠近。

4) 计算强风暴暴雨内核区域边界阈值 $T_{heavyrain}$ ，判定短时强降水特征的存在与否

根据经验，短时暴雨对应的反射率强度达到 50 dBZ 以上。遍历反射度强度 $r \in [48, 55]$ dBZ 对应的格点，以 $B_{hr1}(r, 1) \& B_{hr1}(r, 2) \& B_{hr1}(r, 3)$ 为真或者 $B_{hr2}(r, 1) \& B_{hr2}(r, 2) \& B_{hr2}(r, 3)$ 为真来判断该处格点属于暴雨内核区域的边界。暴雨区域边界处对应的反射率强度 r 在平均梯度分布曲线 $G(r)$ 上反映出连续递增，或者连续递减的特征。找到所有该类格点对应的反射率强度值 r ，统计其中出现次数最多的反射率强度 r 就是暴雨内核区域的边界阈值 $T_{heavyrain}$ 。

$$B_{hr1}(r, s) = (G(r + s) - G(r)) > s \times G_d \quad (10)$$

$$B_{hr2}(r, s) = (G(r + s) - G(r)) < s \times G_d \quad (11)$$

5) 计算强风暴冰雹区域的边界阈值 T_{hail} ，判定冰雹结构特征的存在与否

根据气象预报员的经验，当反射率数据处于 55~60 dBZ 时，强风暴体内部会出现冰雹。冰雹区域边界处对应的反射率强度 r 在平均梯度分布曲线 $G(r)$ 上反映出首先递增，而后迅速递减的特征。遍历反射度强度 $r \in [52, 60]$ dBZ 的格点，以 $B_h(r, 1) \& B_h(r, 2) \& B_h(r, 3) \& (G(r) > G(r - 1))$ (公式 (10), (11))为真来判断该处格点属于冰雹区域的边界。找到所有该类格点对应的反射率强度值 r ，统

计其中出现次数最多的反射率强度 r 就是冰雹区域的边界阈值。

$$B_h(r, s) = (G(r) - G(r + s)) > G_d \quad (12)$$

6) 计算上述特征区域的外边界

风暴的各类特征区域的边界存在一定的厚度，而步骤(1~5)中所识别的 4 类强风暴属性的边界实际为对应结构的内边界。因此，从已识别的边界阈值 $r = T_r$ ($T_r = T_{cov}, T_{incov}, T_{heavyrain}, T_{hail}$)开始，以 r 递减的顺序计算 $G(r)$ 。当 $abs(G(r) - G(T_r)) > G_d$ ，则认为此时的 $r - 1$ 是对应强风暴属性的外边界阈值。

3 强风暴结构特征的三维可视化

根据实际计算得到的各类边界阈值，本章对强风暴体边界，强风暴内核区域，暴雨内核区域，冰雹区域等结构特征进行突出显示。

针对强风暴内各种属性的结构特征的特点，以改进光线投射算法^[36]进行三维绘制，解决了传统体绘制方法生成透视结果较为模糊，难以清楚地区分内部多层结构的问题，清晰地重构强风暴内部的结构特征。本章主要针对经典的光线投射算法中点采样的过程，传输函数(颜色值和透明度的计算)这 2 个关键步骤进行改进。

3.1 点采样过程

对比历史统计的强风暴体结构和经典强风暴的物理模型来看，风暴体数据的空间结构具有外层数值较小，分布面积较大；中心数值较大，分布面积相对较小；内部数值教大区域通常还对应着强烈灾害性天气等规律。但是，由于其实际内部结构的复杂性：垂直风切变环境中风暴形状存在一定的扭曲、入流区域存在弱回波区域以及回波悬垂结构等情况，以及存在噪声数据的影响，采集的反射率强度数据有时候不是均匀的按从小到大的顺序自外层向内层排列，多层等值面可能会在局部出现交错重叠的情况。

传统的光线投射算法在图像空间对每个屏幕

像素发射一条射线,取微小的相等间隔对三维网格体数据进行点采样,屏幕像素的颜色由射线上所有的采样点按深度排序叠加后决定。经观察发现数据层数越多或者颜色层次变化越多,均会造成半透明效果的模糊不清。如果以扩大采样间隔的方式减少点的采样,在细节丰富的局部会遗漏数据点,造成风暴体结构边界的缺失,从而无法精确地显示雷达数据的内部属性特征。

基于上述观察,在采样过程中,首先检查射线上的每个采样点对应的反射率数据 r ,当 r 属于特征区域的边界时,判断该采样点有效。当连续采样的多个点都属于同一类特征区域时,只需取前 s 个采样点参与绘制就能表达该特征区域的形状特征。

3.2 传输函数的设计

传输函数的作用是将数据映射成不同颜色值和透明度,用于最终的绘制。根据强风暴数据的特点和气象预报员的习惯,设计一维传输函数 $F()$,将数据均分为 n 个区间,同一区间内的数据 value 映射为同一颜色 $F(\text{value})=k$ 。本文所用的色标如图 6 所示。



图 6 雷达反射率强度 value 对应的颜色值 k

在设定对应的透明度时,突出显示 4 类特征区域:强风暴区域(边界阈值 T_{cov}),强风暴内核区域(边界阈值 T_{incov}),强风暴暴雨内核区域(边界阈值 $T_{\text{heavyrain}}$),和强风暴冰雹区域(边界阈值 T_{hail})。通过实验,采用如下步骤和透明度参数值进行绘制:

- 1) 如果只存在 T_{cov} ,将反射率强度大于 T_{cov} 的采样点透明度设置为 1.0(全透明);
- 2) 如果只存在 T_{cov} 和 T_{incov} ,将反射率强度大于 T_{incov} 的采样点透明度设置为 1.0。将反射率强度满足 $r \in [T_{\text{cov}} - 1, T_{\text{cov}} + 1]$ 的采样点透明度设置为 0.3;

3) 如果存在 T_{cov} , T_{incov} 和 $T_{\text{heavyrain}}$,将反射率强度大于 $T_{\text{heavyrain}}$ 的采样点透明度设置为 1.0。将反射率强度满足 $r \in [T_{\text{cov}} - 1, T_{\text{cov}} + 1]$ 的采样点透明度设置为 0.1。将反射率强度满足 $r \in [T_{\text{incov}} - 1, T_{\text{incov}} + 1]$ 的采样点透明度设置为 0.5;

4) 如果存在 T_{cov} , T_{incov} 和 T_{hail} ,将反射率强度大于 T_{hail} 的采样点透明度设置为 1.0。将反射率强度满足 $r \in [T_{\text{cov}} - 1, T_{\text{cov}} + 1]$ 的采样点透明度设置为 0.1。将反射率强度满足 $r \in [T_{\text{incov}} - 1, T_{\text{incov}} + 1]$ 的采样点透明度设置为 0.5。

在此基础上调节透明度来增强各类结构边界处的清晰度。使用离散差分公式计算强风暴体各类结构边界处的梯度幅值 $|D(x, y, z)|$,认定梯度幅值与需增强的效果成正比:

$$|D(x, y, z)| = \sqrt{D_x^2 + D_y^2 + D_z^2} \quad (13)$$

类似 Roberts 微分算子,使用卷积模版将梯度幅值的求解近似简化为: $|D(x, y, z)| = |D_x| + |D_y| + |D_z|$ 。其中, D_j 表示 j 方向的偏导数。

假设依据经典的光线投影算法计算得到点 i 处的透明度为 A'_i 。增强后的透明度 a' 与梯度幅值 $|D(x, y, z)|$ 和光线衰减 attenuate 因素的关系为:

$$a' = 1 - (A'_i + k |D(x, y, z)|) \times (1 - \text{attenuate}) \quad (14)$$

4 实验结果与分析

本章将本文提出的算法应用于分析和显示 3 个典型的强风暴个例。在实际应用中,特征结构的准确识别需要依靠于气象预报员对二维和三维的分析结果进行综合判断。通过实验发现,强风暴体边界的反射率数值对应的颜色以黄色为主,强风暴内核区域的反射率数据对应的颜色以红色为主,暴雨内核区域的反射率数值对应的颜色以紫色为主,冰雹区域的反射率数值对应的颜色以紫色或白色为主。因为形成机制的不同,暴雨区域和冰雹区域在经验上认为不会在同一时刻存在于同一位置。

4.1 远距离较完整探测的强风暴个案

该个案发生在世界时 2013-08-25T05:54:00。该风暴属于中等强度的强对流风暴。地面实况观测到的数据显示, 该地区出现了 8 级雷雨大风和 34.2 mm/h 的短时强降水, 垂直运动剧烈区域检测到大量的闪电现象。

根据本文第 2 章算法计算出该风暴体的平均梯度统计曲线如图 7(a)所示, 自动识别出的 3 项边界阈值为 $T_{cov}=32$ dBZ, $T_{incov}=48$ dBZ, $T_{hail}=54$ dBZ。分析各区域边界的阈值发现该风暴整体性反射率强度较强, 存在短时强降水可能。此外, T_{hail} 的存在表明较大可能存在冰雹。定性该强风暴的属性为: 中空冰雹, 短时暴雨。

雷雨大风风暴内核区域结构以及中空的冰雹结构的二维和三维显示结果分别如图 7(b)和图 7(c)所示。气象预报员观察三维显示效果后发现, 在识别出的单个风暴区域内, 存在多个风暴单体结构; 风暴下部都是 45 dBZ 以上的密实云体, 意味着该区域存在短时强降水; 强风暴云体的南侧出现了一定的回波悬垂结构, 云顶发展高度很高, 表明风暴垂直上升运动非常剧烈, 会造成雷雨大风灾害; 在高耸的对流云体内, 出现了密实的空中冰雹区域。

4.2 近距离不完整探测的强风暴个案

该个案为发生在世界时 2007-07-23 的强风暴过程, 选择 2 个时次(09:08:00 和 09:33:00)进行分

析与可视化。该过程造成了雷达大风, 冰雹和短时暴雨灾害性天气。地面自动站实况监测到了 72 mm/h 的短时暴雨雨量。在 09:17:00 地面实况监测到了黄豆大小的落地冰雹。

09:08:00 的风暴平均梯度分布曲线如图 8(a)所示, 自动识别出的 3 项边界阈值分别为 $T_{cov}=30$ dBZ, $T_{incov}=41$ dBZ, $T_{hail}=53$ dBZ。分析阈值后发现该风暴整体性反射率强度较强, 存在短时强降水可能。此外, T_{hail} 的存在表明可能存在冰雹。定性该强风暴的属性为: 低空可能落地冰雹, 短时暴雨以及雷雨大风。风暴内核区域结构以及低空的冰雹结构体的二维和三维显示结果分别如图 8(b)和 8(c)所示。从可视化结果判定, 该强风暴最初(09: 08:00)尺度较小, 风暴的水平最大尺度为 15 km。从 3 km 等高面观察到反射率数据强值区域的强度达到 40 dBZ 以上, 局部 55 dBZ 以上, 具有短时强降水的可能。观测三维结构(图 8(c))发现强风暴的倾斜性非常大, 存在明显的有界弱回波区和非常强的回波悬垂结构特征。气象预报员综合分析认为, 该风暴从东向西快速加强发展, 在该时次存在非常强的垂直风切变, 利于冰雹的发展生成。

09:33:00 的风暴平均梯度分布曲线如图 9(a))所示, 自动分析出的 3 项边界阈值分别为 $T_{cov}=30$ dBZ, $T_{incov}=43$ dBZ, $T_{heavyrain}=53$ dBZ。与 09:08:00 的平均梯度分布曲线相比, 此刻冰雹的特征逐步减弱, 演变为暴雨特性。定性该强风暴的属性为: 短时暴雨以及雷雨大风。

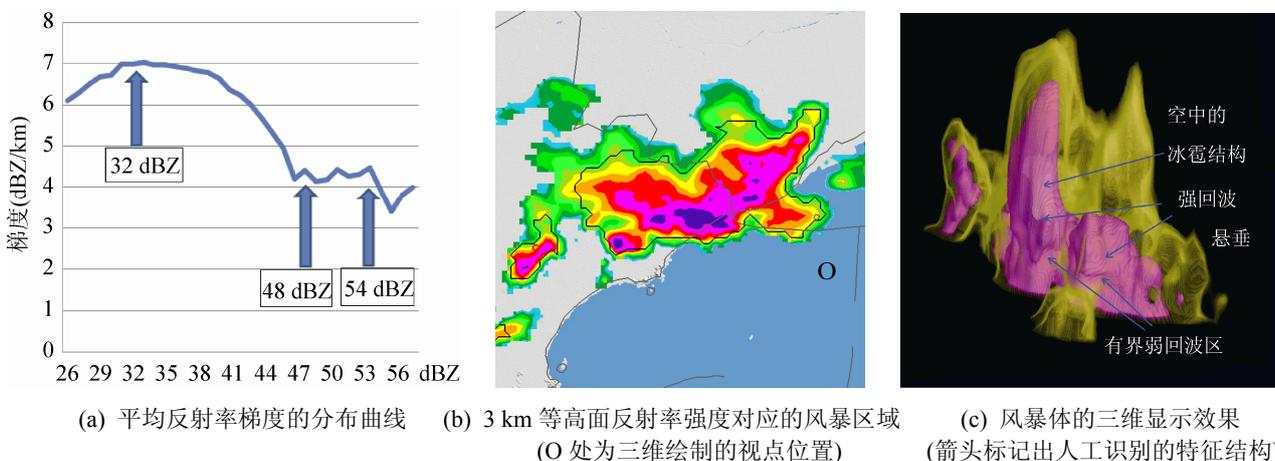


图 7 世界时 2013-08-25 T05:54:00 的强风暴数据

<http://www.china-simulation.com>

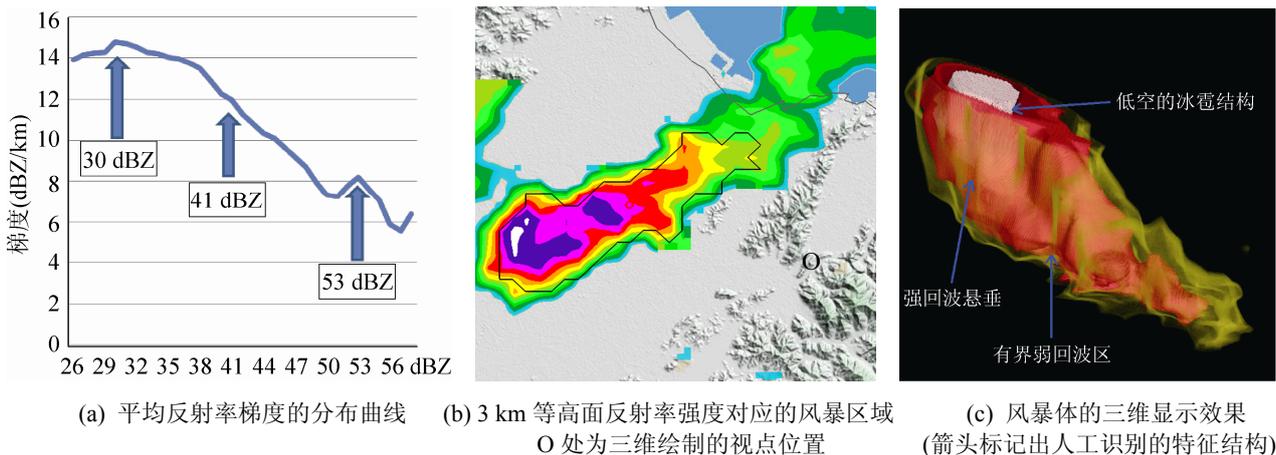


图 8 世界时 2007-07-23T09:08:00 的强风暴数据

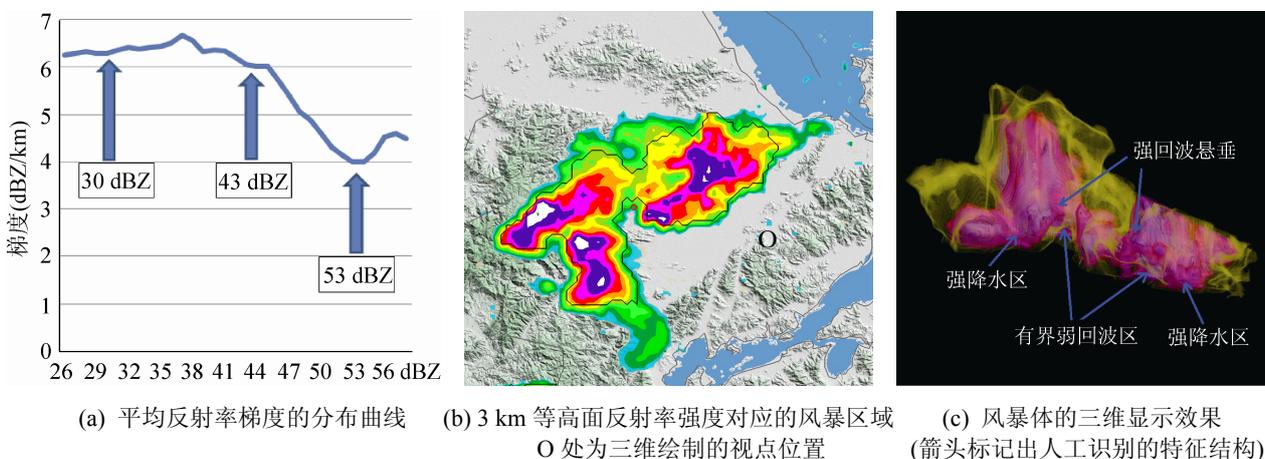


图 9 世界时 2007-07-23T09:33:00 的强风暴数据

风暴内核区域结构以及短时暴雨区域的二维和三维显示结果如图 9(b)和图 9(c)所示。从图 9(c)中发现强风暴主体强度在 45 dBZ 以上。相对于 09:08:00 风暴的结构而言,气象预报员发现 09:33:00 的强风暴倾斜性较小,呈现相对垂直特性,所以该时刻垂直风切变较 09:08:00 有所减弱。此外,该时刻的风暴内部结构比较复杂,同时存在逐步加强合并的 3 个风暴单体。风暴体内有界弱回波区和强回波悬垂结构特征均十分显著。较远处的强风暴单体具有较高的对流云高度,表明其垂直上升气流非常强烈。近处的强风暴单体由之前时刻的冰雹云风暴单体演变而来,从其底层的回波结构和强度特征,能估计其至少具有和后部的单体风暴相同量级的云顶高度。风暴云的透视结构显示内部大量的雨滴对应的反射率强度达到 50~55 dBZ,预示

暴雨过程的形成。

4.3 局地孤立发展的强风暴个例

该个例为发生在世界时 2007-08-03T04:48:00 的强风暴过程。该风暴属于局地性孤立发展的强风暴单体。实况观测到了 9 级雷雨大风。由于该风暴发生于山区地带,地面自动站实际只监测到了强风暴边缘 15.3 mm/h 的短时强降水。

该风暴的平均梯度分布曲线如图 10(a)所示,自动识别出的 3 项边界阈值分别为 $T_{cov}=30$ dBZ, $T_{incov}=41$ dBZ, $T_{heavyrain}=51$ dBZ。

定性该强风暴的属性为:短时暴雨以及雷雨大风。

风暴内核区域结构以及短时暴雨区域的二维和三维显示结果如图 10(b)和 10(c)所示。图 10(c)

表明该风暴近乎垂直发展, 云顶高度很高, 风暴的回波悬垂结构并不显著, 虽然该风暴的垂直风切并不强烈, 但是垂直上升气流比较剧烈, 容易形成雷雨大风天气。观测风暴的立体结构发现其内部存在较大范围的对应反射率强度在 50~55 dBZ 的大雨滴, 易造成短时强降水灾害。

4.4 气象预报员的主观评估分析

为了评估本文的算法是否能辅助气象预报员更准确地识别风暴的结构特征, 征集了 5 名浙江省宁波气象台的业务预报员参与人工评估。让气象预报员操作(旋转, 缩放, 平移等)三维绘制软件, 观测 4.1~4.3 节所示的个例, 回答观测哪些特征结构,

并对风暴整体性结构进行描述。

参与评估的预报员认为能够观测到所示个例中存在的包括回波悬垂, 有界弱回波, 短时强降水区, 潜在落地冰雹在内的特征。但是, 有预报员提出短时暴雨区域的边界显示还不够清晰。相比较传统的二维显示方法, 气象预报员认为通过本文构建的三维绘制系统能够更快速和直观地掌握风暴体内部的立体结构。以图 7~10 中(b)图对应的风暴剖面为例, 根据多层二维数据, 气象预报员可以观测到强反射率数值(往往对应灾害性天气)的区域分布, 但是无法直接判断出内核紫色和白色区域存在暴雨还是冰雹。

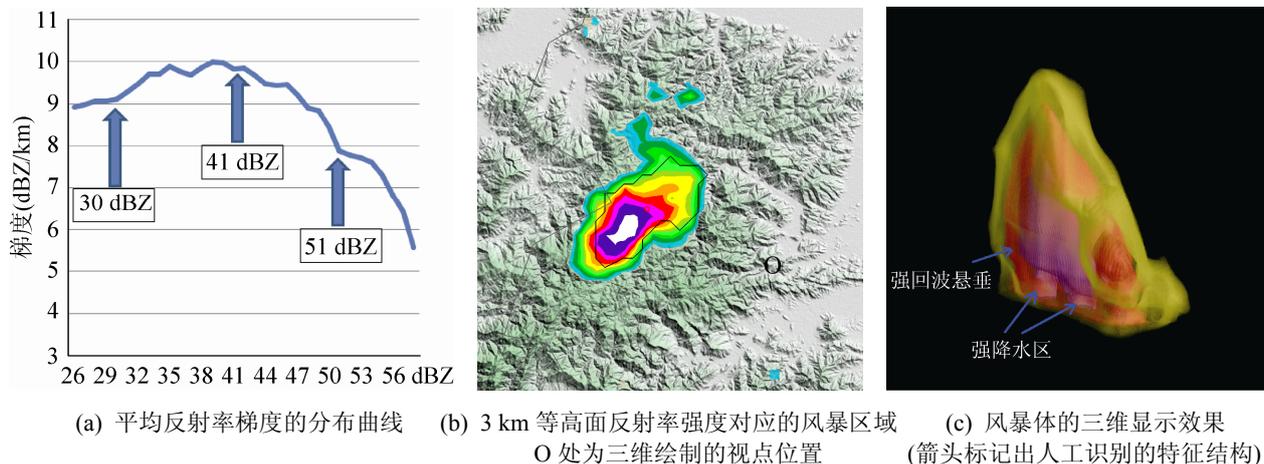


图 10 世界时 2013-08-03T04:48:00 的强风暴数据

5 结论

本文提出了一种自适应的强风暴内部结构的识别算法, 实现了对多各种类型属性存在与否的判断, 以及各类结构特征所在区域的自动提取。本文通过改进的体绘制算法, 实现可以按照气象学模型自适应选择需要增强显示风暴的内部的立体结构。通过预报员综合观测个例的二维和三维显示结果, 能够识别出常规二维分析所不能直接推断出的短时强降水区域, 潜在落地冰雹区域等重要结构。因此, 本文的识别与显示算法, 可辅助预报员更好地把握强风暴的空间回波结构和发展状况, 为强风暴的短时临近预报提供重要的技术支持。

后续将针对强风暴内部特征结构的分析进行更为深入的研究。通过引入其他同步观测数据(比如径向速度数据, 闪电定位数据, 自动站数据等等), 以雷达气象学理论为基础, 将多种数据进行匹配和综合分析, 识别更多类别的结构特征, 对强风暴内部的上升、下沉气流走向进行合理的预测。

参考文献:

[1] 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]. 1 版. 北京: 气象出版社, 2007.
[2] 王洪庆, 张炎, 郑永光, 等. 气象信息科学视算环境及其若干问题 [J]. 气象学报, 2004, 62(5): 709-713. (Wang H, Zhang Y, Zheng Y, et al. Meteorological Data

- Visualization System [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2004, 62(5): 709-713.)
- [3] 俞小鼎. 强对流天气的多普勒天气雷达探测和预警[J]. *气象科技进展*, 2011, 1(3): 31-41. (Yu X. Detection and Warnings of Severe Convection with Doppler Weather Radar [J]. *Advances in Meteorological Science and Technology*, 2011, 1(3): 31-41.)
- [4] Forsyth D E. Real Time Forecasting of Echo-centroid Motion [D]. USA: Department of Meteorology, University of Oklahoma, 1979.
- [5] Houze Jr R A. A Climatological Study of Vertical Transports by Cumulus-Scale Convection [J]. *Journal of the Atmospheric Sciences* (S0022-4928), 1973, 30(6): 1112-1123.
- [6] Churchill D D, Houze Jr R A. Development and Structure of Winter Monsoon Cloud Clusters On 10 December 1978 [J]. *Journal of the Atmospheric Sciences* (S0022-4928), 1984, 41(6): 933-960.
- [7] Steiner M, Houze Jr R A, Yuter S E. Climatological Characterization of Three-Dimensional Storm Structure from Operational Radar and Rain Gauge Data [J]. *Journal of Applied Meteorology* (S1558-8424), 1995, 34(9): 1978-2007.
- [8] Shusse Y, Takahashi N, Nakagawa K, *et al.* Polarimetric Radar Observation of the Melting Layer in A Convective Rainfall System during the Rainy Season over the East China Sea [J]. *Appl. Meteorol. Climatol.* (S0899-8418), 2011, 50(2): 354-367.
- [9] Biggerstaff M I, Listemaa S A. An Improved Scheme for Convective/Stratiform Echoclassification using Radar Reflectivity [J]. *Journal of Applied Meteorology* (S1558-8424), 2000, 39(12): 2129-2150.
- [10] Johnson J T, MacKeen P L, Witt A, *et al.* The Storm Cell Identification and Tracking Algorithm: An Enhanced WSR-88D Algorithm [J]. *Weather & Forecasting* (S1520-0434), 1998, 13(2): 263-276.
- [11] Zhang J, Carrie L, Kenneth H. Brightband Identification Based on Vertical Profiles of Reflectivity from the WSR-88D [J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* (S0739-0572), 2008, 25(10): 1859-1872.
- [12] Zhang J, Qi Y. A Real-time Algorithm for the Correction of Brightband Effects in Radar-derived QPE [J]. *Journal of Hydrometeorology* (S1525-755X), 2010, 11(5): 1157-1171.
- [13] Zhang J, Howard K, Carrie L, *et al.* National Mosaic and Multi-sensor QPE (NMQ) System: Description, Results, and Future Plans [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society* (S1520-0477), 2011, 92(10): 1321-1338.
- [14] Zhang J, Qi Y, Kingsmill D, Howard K. Radar-based Quantitative Precipitation Estimation for the Cool Season in Complex Terrains: Case Studies from the NOAA Hydrometeorological Testbed (HMT) [J]. *Journal of Hydrometeorology* (S1525-755X), 2012, 13(6): 1836-1854.
- [15] 韩雷, 郑永光, 王洪庆, 等. 基于数学形态学的三维风暴体自动识别方法研究 [J]. *气象学报*, 2007, 65(5): 805-814. (Han L, Zheng Y, Wang H, *et al.* 3D Storm Automatic Identification Based on Mathematical Morphology [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2007, 65(5): 805-814.)
- [16] Hibbard W, Santek D. Visualizing Large Data Sets in the Earth Sciences [J]. *Computer* (S0018-9162), 1989, 22(8): 53-57.
- [17] Phil McDonald, Paula McCaslin, Ed Szoke. Display 3-Dimensional (D3D) [EB/OL]. (2008-02-20) [2015-10-20]. <http://laps.noaa.gov/d3d/>
- [18] Akiba H, Wang C L, Ma K-L. AniViz: A Template-based Animation Tool for Volume Visualization [J]. *IEEE Computer Graphics and Applications* (S0272-1716), 2010, 30(3): 61-71.
- [19] 王洪庆, 张焱, 陶祖钰, 等. 五维大型复杂数据集计算机可视化 [J]. *自然科学进展*, 1998, 8(6): 742-748.
- [20] 王洪庆, 张焱, 陶祖钰. 黄海气旋数值模拟的可视化 [J]. *应用气象学报*, 2000, 11(3): 280-286. (Wang H, Zhang Y, Tao Z. Visualization of the Numerical Simulation of a Yellow Sea Cyclone [J]. *Applied Meteorological Science*, 2000, 11(3): 280-286.)
- [21] 皮学贤, 蔡勋, 宋君强. 气象可视化原型系统的设计与实现 [J]. *计算机工程与科学*, 2001, 3(1): 51-54.
- [22] 普业, 王鹏飞, 徐予红, 等. AVS/Express 开发气象三维可视化系统[C]//科学数据库与信息技术论文集. 云南丽江: 中科院科学数据库办公室, 2004:394-399.
- [23] 何全军, 曹静. 利用 IDL 语言实现对气象数据的体视化显示 [J]. *气象科学*, 2007, 27(4): 445-450. (He Q, Cao J. The Realization of Volume Visualization in Meteorological Data by IDL [J]. *Scientia Meteorologica Sinica*, 2007, 27(4): 445-450.)
- [24] 华文元, 王家润, 康亮, 等. 基于 OSG 五维气象可视化软件的设计及实现 [J]. *计算机工程与设计*, 2009, 30(5): 1282-1284. (Hua W, Wang J, Kang L, *et al.* Design and Implementation of 5D Meteor Visualization Based on OSG [J]. *Computer Engineering and Design*, 2009, 30(5): 1282-1284.)

- [25] 张志强, 刘黎平, 王红艳. 三维可视化技术在雷达三维组网产品显示中的运用 [J]. 气象科技, 2010, 38(5): 605-609. (Zhang Z, Liu L, Wang H. Application of 3D Visualization Technology to Display of Doppler Radar Networking Products [J]. Meteorological Science and Technology, 2010, 38(5): 605-609.)
- [26] 侯焕, 韩雷, 林忠宇. VTK 技术在雷达图像可视化中的研究与应用 [J]. 现代电子技术, 2010, 3(6): 122-124. (Hou H, Han L, Lin Z. Study and Application in Visualization of Radar Image Based On VTK [J]. Modern Electronics Technique, 2010, 33(6): 122-124.)
- [27] GR2analyst. [EB/OL]. [2015-10-20]. http://www.grlevelx.com/gr2analyst_2
- [28] Upson C, Keeler M. V-BUFFER: Visible Volume Rendering [J]. Computer Graphics (S1069-529X), 1988, 22(4): 59-64.
- [29] Joshi A, Caban J, Rheingans P, *et al.* Case Study on Visualizing Hurricanes Using Illustration-Inspired Techniques [J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics (S1077-2626), 2009, 15(5): 709-718.
- [30] Tikhonova A, Correa C, Ma K-L. An Exploratory Technique for Coherent Visualization of Time-Varying Volume Data [J]. Computer Graphics Forum (S1467-8659), 2010, 29(3): 783-792.
- [31] 屠文洁. 三维气象数据的可视化研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2008.
- [32] 高希伟. 时变气象体数据的可视化技术研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2011.
- [33] Lopez-Sanchez J M, Fortuny-Guasch J. Retrieval of Height and Topography of Corn Fields by Polarimetric SAR Interferometry [C]// Proceedings of IGARSS. Anchorage, Alaska: IEEE, 2004(2): 1228-1231.
- [34] Zhang J, Wang S, Clarke B. P5.4 WSR-88D Reflectivity Quality Control using Horizontal and Vertical Reflectivity Structure [C]// Preprints, Proceedings of the 11th Conference on Aviation, Range and Aerospace Meteorology, IS. Hyannis, MA: AMS, 2004(1): 5-6.
- [35] Zhang J, Howard K, Gourley J J. Constructing Three-Dimensional Multiple-Radar Reflectivity Mosaics: Examples of Convective Storms and Stratiform Rain Echoes [J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology (S0739-0572), 2005, 22(1): 30-42.
- [36] Roettger S, Guthe S, Weiskopf D, *et al.* Smart Hardware-Accelerated Volume Rendering [C]// Proceedings of Eurographics/IEEE TVCG Symposium on Visualization, 2003. USA: IEEE, 2003: 231-238.

(上接第 2700 页)

- [6] Ji Jingjing, LEE K M, Bai Kun, *et al.* A Generalized Framework Using Hardware-in-Evaluation-Loop for Design Optimization [C]// The 2012 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, Kaosiung, Taiwan, China. USA: IEEE, 2012: 659-664.
- [7] Yang Jie, Li Yin. Hardware-In-the-Loop Simulation of Communication Networks [J]. Journal of Beijing Institute of Technology (S1004-0579), 2012, 21(3): 376-381.
- [8] Galli E, Cavarretta G, Tucci S. HLA-OMNET++: An HLA Compliant Network Simulator [C]// IEEE/ACM International Symposium on Distributed Simulation and Real-Time Applications, Vancouver, Canada. USA: IEEE, 2008: 319-321.
- [9] Sung C, Kim T G. Collaborative Modeling Process for Development of Domain-Specific Discrete Event Simulation Systems [J]. Systems, Man, and Cybernetics, Part C: Applications and Reviews, IEEE Transactions on (S1094-6977), 2012, 42(4): 532-546.
- [10] 王振豪, 胡亚辉, 慈松. 面向 QoE 的 LTE 网络流媒体业务半实物仿真平台 [J]. 系统仿真学报, 2014, 26(3): 556-561. (Wang Zhenhao, Hu Yahui, Ci Song. QoE-oriented HIL Simulation Platform for Mobile Streaming in LTE System [J]. Journal of System Simulation (S1004-731X), 2014, 26(3): 556-561.)