

中尺度涡旋客观识别与三维追踪的新方法及其效果评估

张敬萍^{1, 2}, 靳双龙³, 冯双磊³, 韩洪^{4*}, 傅慎明^{1, 2}

1 中国科学院大学, 北京 100049

2 中国科学院大气物理研究所国际气候与环境中心, 北京 100029

3 中国电力科学研究院新能源与储能运行控制国家重点实验室, 北京 100085

4 国家电网山东省电力公司应急管理中心, 济南 250032

摘要: 中尺度涡旋是引发强降水等一系列气象灾害的重要天气系统之一。中尺度涡旋识别是对其进行研究的重要基础。目前, 如何客观准确地识别中尺度涡旋并对其进行较全面的评估仍是一项充满挑战的任务。本文从我国中尺度涡旋的基本特征出发, 提出了一种基于风场和相对涡度场的涡旋识别标准, 并发展了适用于高分辨率格点数据的中尺度涡旋客观识别算法。该算法能准确识别出中尺度气旋性环流并定位涡旋中心, 较现有常规中尺度涡旋识别方法而言, 具有误判率低, 定位精度高等特点。本文将该客观识别算法应用于长江流域频发的三类中尺度涡旋(高原涡, 西南涡, 大别山涡)的识别中, 结果表明对于不同时间段、不同分辨率的再分析资料(逐6小时 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 的 NCEP CFSR 再分析资料、逐小时 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 的 ERA5 再分析资料), 本识别算法对三类中尺度涡旋均有较好的识别效果。本文基于 1979-2020 年共 42 年暖季(5-9 月)大别山涡的数据集(共计 36357 时次)对新发展的中尺度涡旋客观识别算法进行了定量评估, 结果表明本算法能够长期稳定的识别涡旋, 42 年的平均命中率为 95.5%。此外, 本文提出了涡旋连续性判定和三维追踪方案, 较现有常规中尺度涡旋追踪方法具有显著优势。

关键词: 中尺度涡旋, 客观识别, 定量评估

文章编号

中图分类号

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2111.21178

A New Objective Identification Method for Mesoscale Vortices:

Three-dimensional Tracking and its Quantitative Evaluation

收稿日期: 2021-9-17; 网络预出版日期:

作者简介 张敬萍, 女, 1989 年出生, 博士研究生, 从事中尺度气象学研究。E-mail: zhangjingping@mail.iap.ac.cn

通信作者 韩洪, E-mail: hhdh2608@163.com

ZHANG Jingping^{1,2}, JIN Shuanglong³, FENG Shuanglei³, HAN Hong^{4*}, and FU Shenming^{1,2}

1 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

2 International Center for Climate and Environment Sciences, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

3 State Key Laboratory of Operation and Control of Renewable Energy & Storage Systems, China Electric Power Research Institute, Beijing 100085

4 Emergency Management Center, State Grid Shandong Electric Power Company, Jinan 250032

Abstract: Mesoscale vortex (MV) is one of the most important weather systems that causes precipitation and meteorological disasters in China. However, there is no universal standard of MV identification, and the MV objective identification is still an urgent problem to be solved. Based on the main features of MVs in China, a new objective identification algorithm (new algorithm for short) suitable for high-precision grid data is developed in this study, by combining the wind and vorticity. The new algorithm can accurately identify the mesoscale cyclonic circulation and locate the vortex center, with lower false rate and higher positioning accuracy than existing identification methods. The new algorithm is applied to three kinds of mesoscale vortices (Plateau vortex (TPV), Southwest vortex (SWV) and Dabie Mountain vortex (DBV)) frequently occurring along the Yangtze river basin, the results show that the new algorithm performed well in all the three kinds of MVs with almost insensitive to applied period or data resolution (6-hourly $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ NCEP CFSR reanalysis data, hourly $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ ERA5 reanalysis data). Based on the DBV activity dataset of DBV (the total DBV occurrence is 36357) in the warm season (May - September) during 1979 - 2020, the new algorithm is quantitatively evaluated. The evaluations prove that the new algorithm can identify MV in a long-term and stable way, with an average hit rate of 95.5%. In addition, this paper proposes a 3D MV tracking scheme, which has significant advantages over traditional tracking methods.

Keywords: mesoscale vortex (MV), objective identification, quantitative evaluation

1 引言

涡旋是大气中普遍存在的一种系统 (Holton, 2004), 其中, 水平尺度在 2~2000 km 的涡旋被称为中尺度涡旋 (Oranski, 1975; Fu et al., 2020), 它包含了台风、西南涡、高原涡、蒙古气旋、东北冷涡等多种常见的系统。前人的研

究表明，中尺度涡旋可以引发暴雨、冰雹、大风、闪电、暴雪、寒潮、沙尘暴等一系列灾害天气（Bartels and Maddox, 1991; Qian et al., 2002; Tessendorf et al., 2005; 张元春等, 2012; Bovalo et al., 2014; Grunzke et al., 2017; Fierro and Mansell, 2018; Allen et al., 2020），严重威胁着社会经济与人民生命财产安全。

我国是中尺度涡旋频发的国家，暖季，中尺度涡旋是产生我国降水的最重要天气系统之一。我国的中纬度地区自西向东分布着三个重要中尺度涡旋源地：青藏高原，四川盆地及其周边，大别山及其周边（图 1）。这对应了三类频发的中尺度涡旋，分别是高原涡（Tibetan Plateau vortex; TPV），西南涡（Southwest vortex; SWV），以及大别山涡（Dabie Mountain vortex; DBV; 张敬萍等, 2015; Fu et al., 2016）。高原涡是青藏高原夏半年主要的降水系统，这类涡旋是生成于高原主体的中- α 尺度系统（200~2000 km; Oranski, 1975），主要活动在对流层中层（500 hPa）。高原涡大多在高原上生消，在有利的天气形势下，少数高原涡可以移出高原，能够与其他天气系统（南支槽，西南涡）发生相互作用，诱发我国东部大范围暴雨、雷暴等灾害性天气（郁淑华等, 2012; 汤欢等, 2019）。西南涡是在青藏高原大尺度地形、川西高原与四川盆地中尺度地形作用下，受大气环流和加热作用共同影响所产生的中- α 尺度涡旋（卢敬华, 1986; Feng et al., 2016; 李跃清和徐祥德, 2016），其主要位于对流层低层，较为浅薄，在 700 hPa 上最显著（Fu et al., 2015）。西南涡的水平尺度约为 300~500 km，在全年各月均有出现，以春夏季居多（陈忠明和闵文彬, 2000; 陈启智等, 2007; 何光碧, 2012; 马勋丹等, 2018）。西南涡经常引发我国川渝及其下游地区的暴雨过程及洪涝灾害，造成重大的经济损失与人员伤亡。大别山涡（张敬萍等, 2015; Fu et al., 2016, 2017）是另一类长江流域的频发中- α 尺度涡旋，因其生成于大别山及其周边地区（图 1 中位置最东的红框）而命名，我国历史上多次重大洪涝灾害都是由此类涡旋引发（胡伯威和潘鄂芬, 1996; 高坤和徐亚梅, 2001; Ninomiya, 2000; Xu et al., 2011）。大别山涡是一类较浅薄的系统，在 850 hPa 上最明显（Fu et al., 2016），其发生频率与西南涡相当（张敬萍等, 2015）。与西南涡相比，大别山涡的生命史更长，移动性更强，就降水强度和影响范围而言，大别山涡的致灾性不亚于西南涡（张敬萍等, 2015; Fu et al., 2016, 2017）。

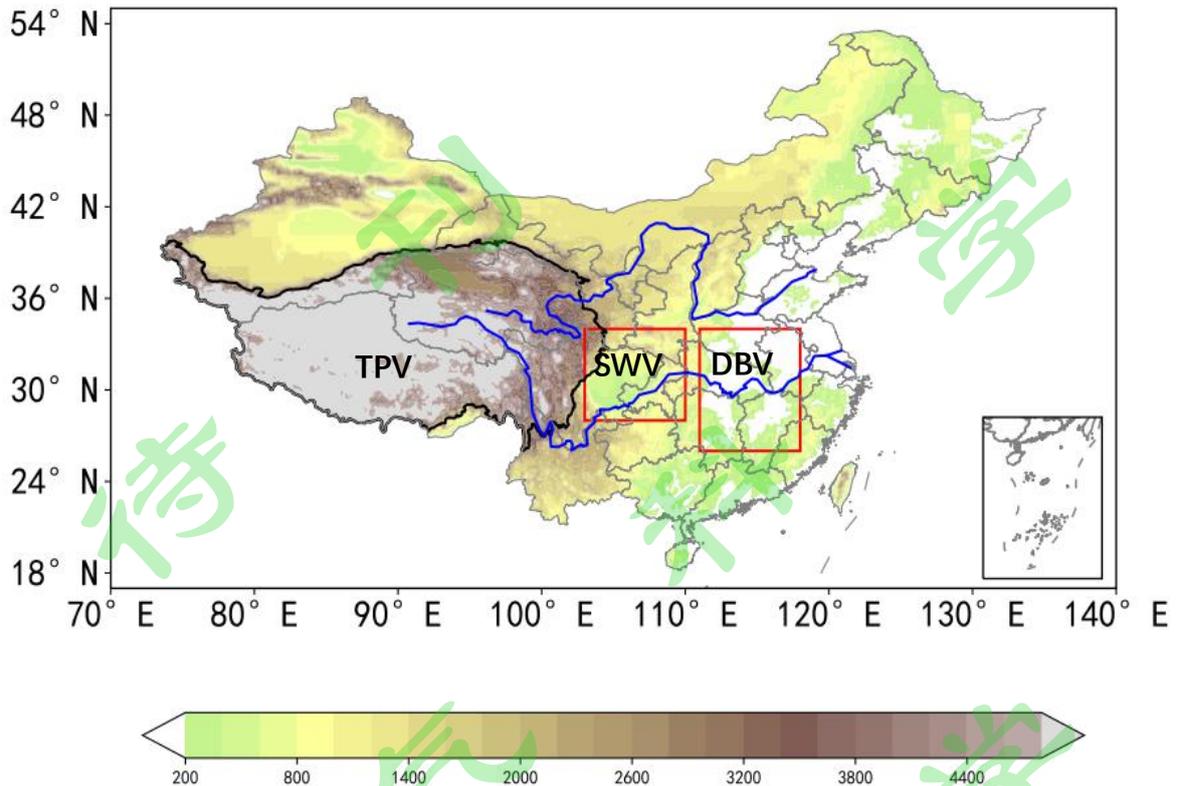


图 1 高原涡，西南涡，大别山涡源地分布（黑线为青藏高原范围，红色矩形框分别为西南涡和大别山涡的源地范围，填色为地形高度，单位：m；TPV=Tibetan Plateau vortex, SWV=Southwest vortex, DBV=Dabie vortex）

Fig. 1 The source regions of TPV, SWV and DBV (The boundary of the Tibetan Plateau is indicated using the black solid line, the two red rectangles represent SWV and DBV respectively, and the shaded area shows terrain, units: m).

鉴于上述三类中尺度涡旋的频发性与致灾性，国内外的学者对其开展了大量研究。中尺度涡旋研究的第一步便是准确地对之进行识别。Davis et al. (2002) 将相对涡度的拉普拉斯作为识别的指标，提出了涡旋识别算法；Hodges et al. (2003) 使用 850 hPa 涡度场识别空间尺度较小的涡旋，并指出这种识别标准适合尺度较小的系统。国内学者以往的研究中，鉴于我国中尺度涡旋的复杂性，人工识别是中尺度涡旋识别的主要方法之一，其主要利用历史天气图或分辨率较粗的再分析资料，将特定气压层上至少三个测站风向逆时针旋转的气旋式环流或者闭合低压中心识别为中尺度涡旋（陈忠明和闵文彬，2000；郁淑华和高文良，2006；王鑫等，2009；李国平和陈佳，2018；杨引明等，2010）。利用算法进行客观识别也是中尺度涡旋识别的主要方法，基于其所用的涡旋识别标准，大致可以分为以下三类：

(i) 位势高度场标准：高正旭等（2009）以 700 hPa 高度场上最低值作为西南涡的识别标准；林志强等（2013）将 500 hPa 高度场上能分析出闭合的低值中心为高原涡的必要条件；沈杭锋等（2013）将 850 hPa 高度场上的低值中心作为识别长江中下游中尺度涡旋的指标。

(ii) 风场标准：王金虎等（2015）在西南涡的识别中，从气旋性条件出发，通过限定某一格点的周围 8 个格点的风向角度，识别逆时针环流；刘梦娟等（2017）在识别长江中下游中尺度涡旋中，通过限定某格点周围 4 格点的风向范围以及格点之间的风向差来识别涡旋。

(iii) 涡度场标准：王薇等（2011）在识别我国东部的中尺度涡旋中，沿用 Davis et al.（2002）的识别方法，计算相对涡度的拉普拉斯算子，将拉普拉斯为负值且相对涡度为正值作为涡旋识别的指标；Fu et al.（2020）为保证涡旋的旋转性和准对称性，发展了“限制涡度（Restricted vorticity）”作为中尺度涡旋识别的指标。

总体而言，现有的中尺度涡旋客观识别方法所得到的涡旋识别结果存在较大的差异，且每种识别方法均存在一定缺陷。其中，基于位势高度场的涡旋识别结果往往较实际涡旋个数显著偏少，这是由于位势高度低值中心并非中尺度涡旋的一个必要条件（对于斜压性较弱的中尺度涡旋，其在位势高度场上反映较不显著），因而，相当数量的中尺度涡旋系统中并不包含中尺度的闭合低压区。基于涡度的客观识别方法对于中尺度涡旋存在严重的误识别现象，无法将切变线，高空槽，鞍形场等系统与涡旋区分开来，往往识别到的涡旋数目显著偏多，且中心位置相对于真实涡旋中心存在显著偏移（Fu et al., 2020）。基于风场的客观识别方法对形态不规则的涡旋识别效果不佳，总体会出现显著的漏识别问题。此外，现有的中尺度涡旋客观识别研究，大多数未基于大样本数据对其识别效果进行定量评估，因而难以明确其真实的涡旋识别效果。

基于上述研究现状，本文提出了一种新的中尺度涡旋客观识别（第 3 节）与追踪算法（第 4 节），其拥有更高准确率。本文还基于 42 个暖季（5-9 月）的大别山涡对此识别算法进行了定量评估，并探讨了造成涡旋识别误差的主要原因。本文的结果为我国三类中尺度涡旋的统计分析提供了有力的研究工具，并可以为涡旋识别算法开发的相关研究提供有益的参考。

2 资料

本文所用的资料为 European Centre for Medium-Range Weather Forecasts 所提供的逐小时、水平分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 的 ERA5 (Hersbach and Dee, 2016) 再分析资料, 以及 National Centers for Environmental Prediction 所提供的逐 6 h、水平分辨率为 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 的 CFSR (Saha et al., 2010) 再分析资料。

3 中尺度涡旋的识别

3.1 涡旋识别标准

我国中纬度地区的三类中尺度涡旋均属于较浅薄的中- α 尺度涡旋 (Feng et al., 2016; Fu et al., 2015; 张敬萍等, 2015), 其斜压性较温带气旋显著偏弱, 又受到地形的影响, 因此常常不存在显著的高度场闭合中心。因此, 使用风场作为涡旋识别指标比高度场更有优势。根据高原涡、西南涡与大别山涡的水平尺度, 本算法定义所识别中尺度涡旋的直径 ≥ 200 km, 且其至少连续出现两个时次 (对于 ERA5 数据而言代表涡旋生命史 ≥ 1 h)。本文在确定涡旋中心时采用了 Fu et al. (2020) 所发展的限制涡度, 限制涡度的计算采用的是中央差分格式, 在北半球使用时, 其要求参与计算的四个格点必须满足 (i) 一致的逆时针环流且 (ii) 由东西向格点所计算的涡度项 ($\partial v / \partial x$, v 为经向风) 与南北向格点所计算的涡度项 ($-\partial u / \partial y$, u 为纬向风) 之比在一定范围内 (本文采用 5 倍)。满足条件 (i) 和 (ii) 的计算值予以保留, 否则记为 0。下文主要以使用 ERA5 资料识别大别山涡为例, 阐述本客观识别算法, 由于大别山涡的中心层次为 850 hPa (Fu et al., 2016), 因此选定该层作为中心层次进行识别。涡旋识别流程如图 2 所示, 主要步骤如下:

第一步为识别中尺度气旋性闭合环流。本步骤的目的是考察以目标格点 (i, j) 为中心, R_f 为半径的矩形范围内 (图 3a) 是否存在气旋性闭合环流 (即涡旋整体流型的确认)。具体做法如下:

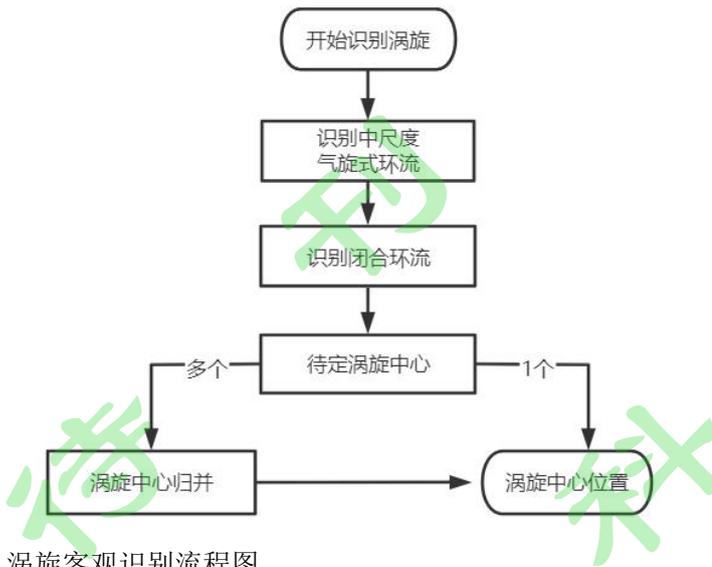


图2 涡旋客观识别流程图

Pic.2 Flow chart of MV objective identification.

(1) 对于水平分辨率为 0.25° 的 ERA5 再分析资料， R_f 取 4 倍格距 (~ 100 km)，以保证识别到的中尺度气旋性环流的水平尺度不低于中- α 涡旋的尺度下限 (200 km)。使用 Fu et al. (2020) 提出的气旋式环流判定方法，以目标格点为中心，半径 R_f 的矩形等分为 8 个象限 (图 3b)，分别计算各象限内所有格点平均的经向风 (\overline{vn} ，其中上横线代表象限平均，n 代表象限号) 与纬向风 (\overline{un})。若满足 $\overline{v1} > 0$ ， $\overline{u2} > 0$ ， $\overline{u3} < 0$ ， $\overline{v4} < 0$ ， $\overline{v5} < 0$ ， $\overline{u6} > 0$ ， $\overline{u7} > 0$ ， $\overline{v8} > 0$ ，认为满足气旋式环流条件。

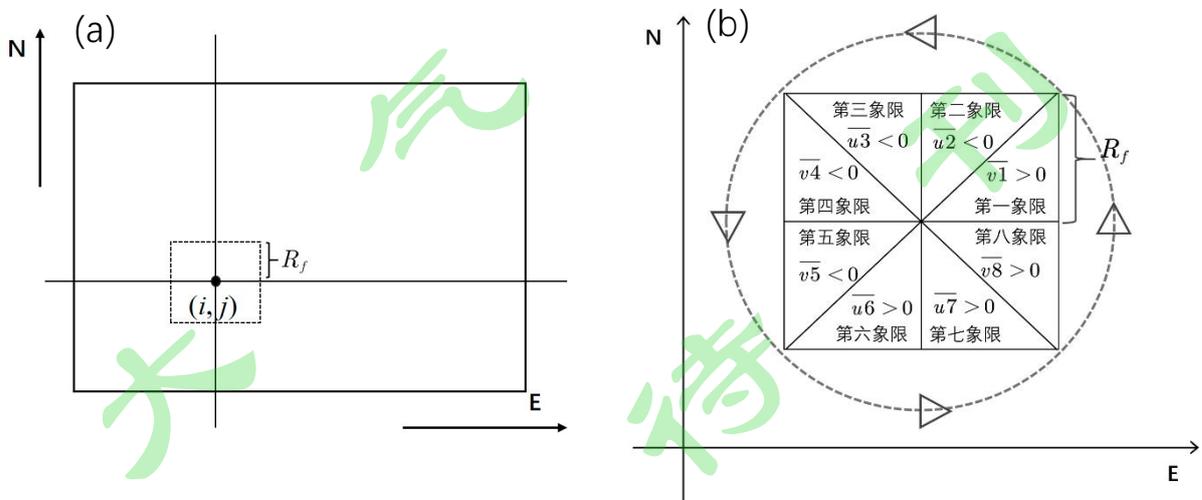


图3 判断区域及气旋式环流识别示意图：(a) 虚线矩形框为实施“气旋式环流条件判断”的区域， R_f 为所识别中尺度涡旋的水平尺度，黑色圆点表示判断区域的中心点；(b) 气旋式环流识别示意图，将判断区域 (矩形框) 分为 8 个象限，各象限内的平均风向 (为纬向

风的平均，为径向风的平均）需满足图中标注的要求，带箭头的虚环线表示气旋性环流

Fig.3 The performing area and schematic diagram of cyclonic circulation identification method. In panel (a), the dashed rectangular box represents the area to perform "cyclonic circulation identification", the black dot is the center point of the performing region, and R_f is the typical scale of a specific type of MV. Panel (b) is the schematic diagram of cyclonic circulation identification method based on octant-averaged wind, the performing area (showed as rectangular box) is divided into eight octants, and each octant-averaged wind should satisfy the cyclonic pattern, as shown by (zonal wind) and (meridional wind) and the gray dashed circle with arrows shows the cyclonic circulation.

(2) 计算目标格点 (i, j) 的上格点 $(i, j+1)$ 、下格点 $(i, j-1)$ 、左格点 $(i-1, j)$ 、右格点 $(i+1, j)$ 的风向，要求目标格点周围 4 个格点的风向满足 $u(i, j+1) < 0, v(i-1, j) < 0, u(i, j-1) > 0, v(i+1, j) > 0$ ，即涡旋核心区域内为气旋式环流（图 4a）。计算目标格点周围 8 个格点的风向，如图 4b 所示，若沿着逆时针方向，8 个格点的风向依次向内侧偏转（靠近当前格点 (i, j) 的一侧为内侧），则认为当前格点 (i, j) 周围存在闭合的逆时针环流。考虑到实际涡旋的形态往往不是规则的圆形，要求图 4c、图 4d 和图 4e 中，至少满足一项即认为满足环流闭合条件。

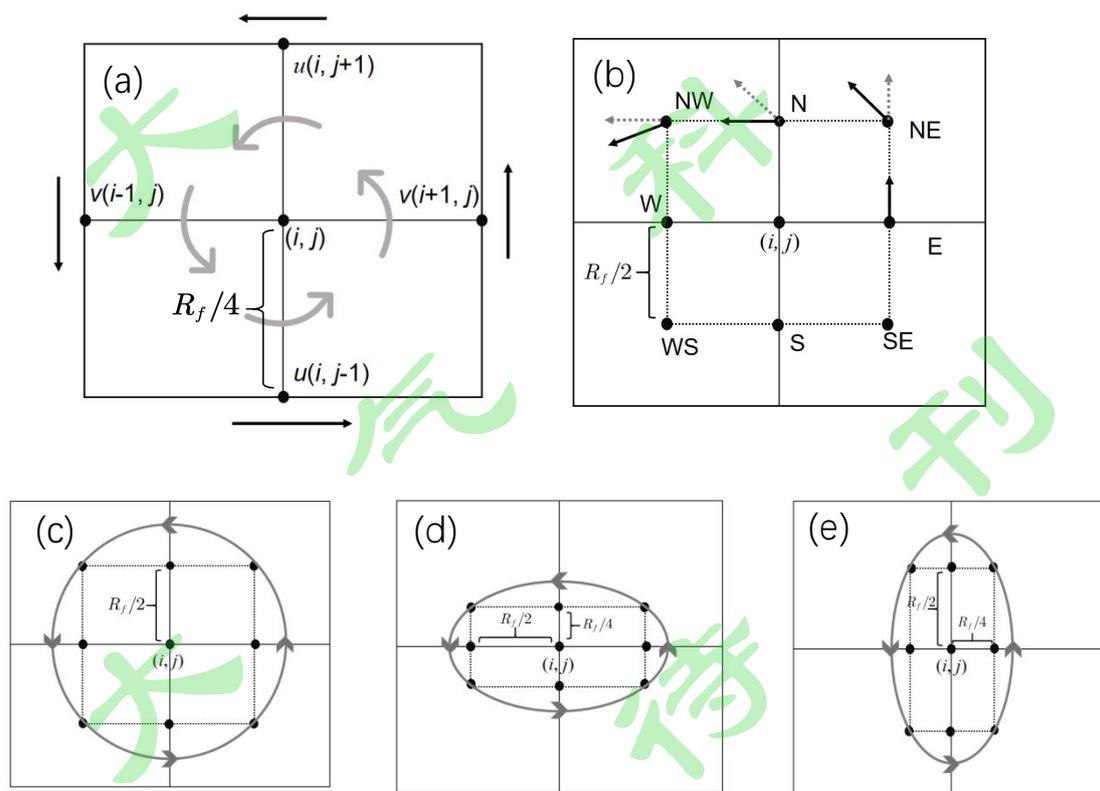


图 4 闭合气旋性环流识别示意图，黑色圆点表示参与计算的格点， (i, j) 表示环流的中心点：(a) 周围 4 格点的风向限定条件，其中黑色箭头表示格点处的经向风（纬向风）方向，灰色弯箭头代表环流；(b-e) 周围 8 格点的风向限定条件，8 个格点的风向需满足依

次向内偏转，形成闭合的逆时针环流，其中图（b）中 E, NE, N, NW 处的箭头表示满足实线箭头表示该格点的风向，虚线箭头为该格点前一格点的风向（沿着逆时针方向），（c-e）分别为由 8 格点风向限定所确定的气旋性环流的三种可能形式，其中灰色环流表示气旋性环流

Fig. 4 Schematic diagram of closed cyclonic circulation identification, with the black dots representing the grid points involved in the calculation, (i, j) representing the center point of the circulation: (a) four surrounding grid points wind direction restriction for closed cyclonic circulation identification, the gray curved arrows show the cyclonic circulation formed by four grid points; (b-e) eight surrounding grid points wind direction restriction for closed cyclonic circulation identification; panel (b) shows the wind direction restriction, the wind directions at eight points should turn inward in sequence along a closed counterclockwise curve, the solid arrows represent the wind direction at E, NE, N, NW respectively, the dashed arrows represent the wind direction at adjacent back point (along counterclockwise); panels (c-e) show three possible forms of closed cyclonic circulation defined by the wind direction of eight grid points, the gray circles with arrows represent the closed cyclonic circulation.

经测试，通过上述限定条件，可以解决现有中尺度涡旋客观识别方法中无法剔除高空槽，切边线，鞍形场的问题。同时，本方法考虑到了逆时针环流的多种形态，因而可以保证复杂风场下，环流较弱的涡旋和形态不规则的狭长型涡旋均能够被准确识别。

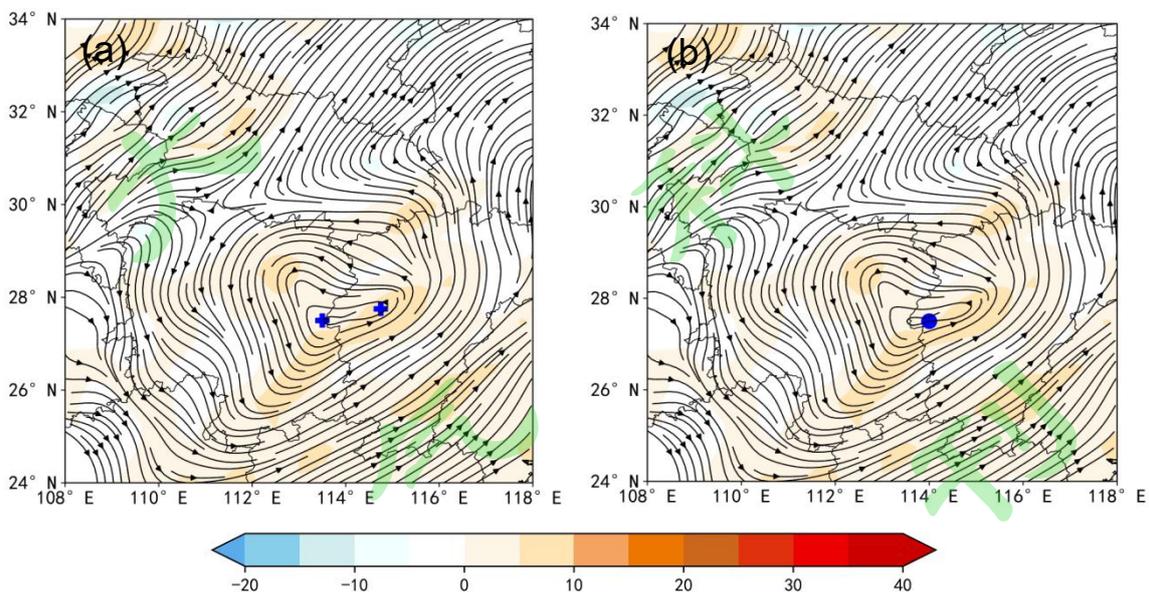


图 5 2013 年 5 月 20 日 19 时（世界时，下同）涡旋中心归并示例，850 hPa 流场（流线）和相对涡旋场（填色，单位： $10^{-5}s^{-1}$ ）：（a）涡旋中心归并前，“+”表示待定涡旋中心；

（b）涡旋中心归并后，实心圆点为归并后的涡旋中心

Fig.5 Example of vortex center merging: 850 hPa streamline field (black line with arrows) and relative vorticity field (shading, units: $10^{-5}s^{-1}$) at 1900 UTC 20 May 2013: (a) without vortex center merging, with "+" indicating the candidate center ; (b) performed vortex center merging, with the solid dot indicating merged vortex center.

第二步为确定涡旋中心。取定第一步中识别所得同一中尺度气旋性闭合环流内限制涡度的所有极大值为“待定涡旋中心”。若仅存在 1 个极大值，则以此极大值作为涡旋中心。若此时存在多个限制涡度的极大值，则需要进行涡旋中心归并，即当存在多个限制涡度的极大值时，则将这些极大值的几何中心定为涡旋的中心。图 5 为一次涡旋中心归并的示例，其中图 5a 中“+”是经过步骤（1）和步骤（2）所识别到的“待定涡旋中心”，该示例中限制涡度的极大值有两个，从流场上看，二者属于同一个中- α 尺度气旋性环流，因此有必要将进行“待定涡旋中心归并”。取几何位置的中心为该示例的涡旋中心，图 5b 中蓝色圆点即为归并后的涡旋中心。

3.2 客观识别算法效果检验

一般而言，尺度较大、近于规则圆形的涡旋易于识别，但当涡旋呈狭长形态或长轴倾斜时，现有的客观识别方法往往不能对之准确识别。对于局地存在多个涡旋的复杂情况，现有的客观识别算法效果不佳。为了评估本文所发展的客观识别方法在不同情况下的识别效果，我们分别随机选取易于以及不易识别的常见情况（狭长形态的涡旋，长轴倾斜型涡旋、局地多涡旋等）进行多组测试。图 6 展示了上述几种情况下的大别山涡客观识别结果，由之可知，本识别方法对气旋性环流显著的涡旋（图 6a），狭长形态的涡旋（图 6b）和长轴倾斜的涡旋（图 6c），均能准确识别；当局地存在多个涡旋时（图 6d），本方法亦能够准确识别到各个涡旋的中心位置。

表 1 不同时段三类涡旋（高原涡，西南涡，大别山涡）客观识别算法评估（使用 ERA5 再分析资料），表中时次数为经人工查验真实的涡旋时次数

Table 1 Hit rates of TPV, SWV, DBV in different period by objective identification algorithm (based on ERA5 reanalysis data), the numbers in this table are the real DBV occurrences derived from manual detection.

涡旋类型	时间段	时次数	命中率
高原涡	2009 年 5 月	475	97.7%
高原涡	2011 年 7 月	1045	97.6%
西南涡	2001 年 5 月	249	97.1%
西南涡	2017 年 6 月	307	93.4%
西南涡	2020 年 7 月	384	98.1%
大别山涡	2002 年 8 月	528	96.9%
大别山涡	2008 年 6 月	436	94.6%
大别山涡	2013 年 7 月	220	90%

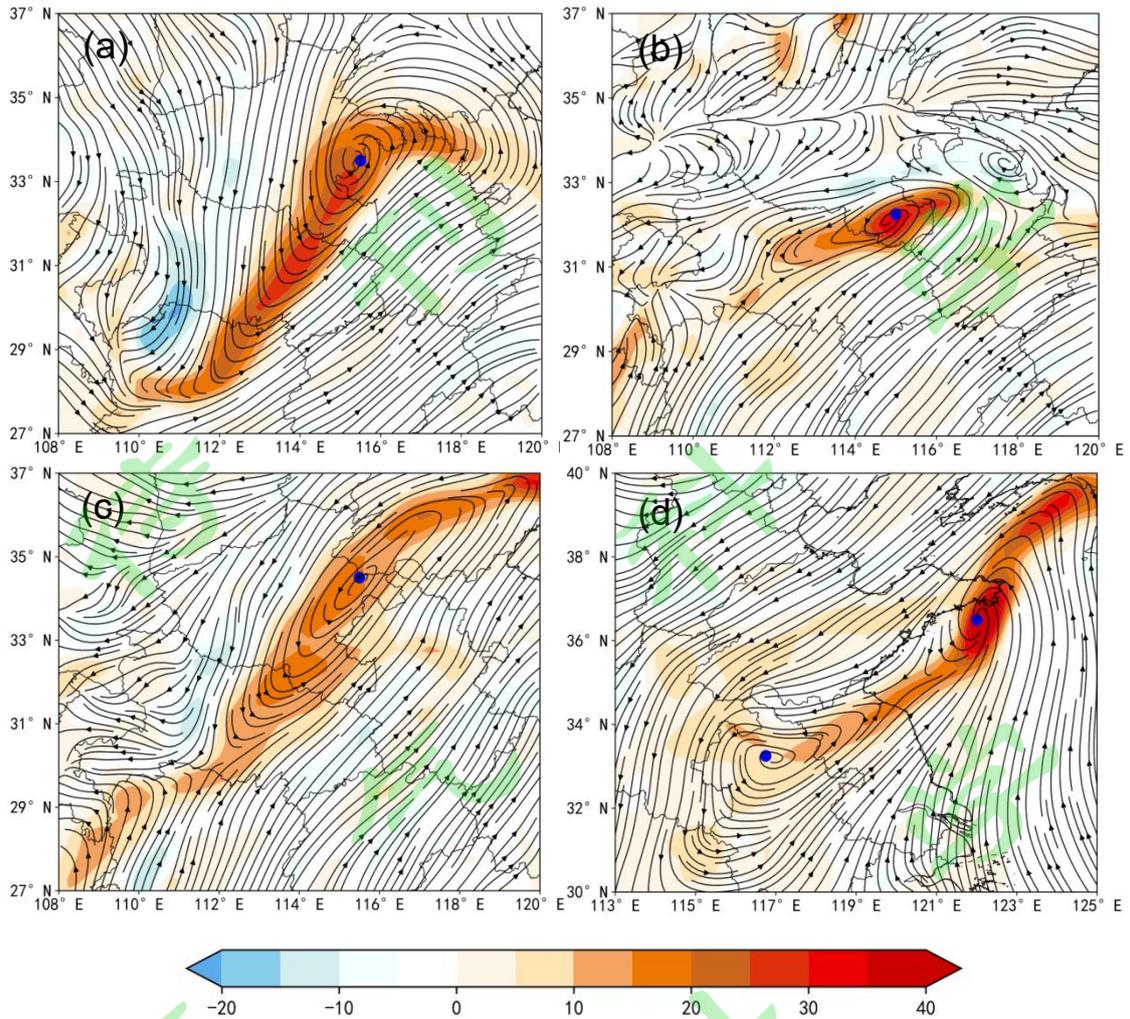


图 6 大别山涡客观识别示例，850 hPa 流场（流线）和相对涡旋场（填色，单位： $10^{-5}s^{-1}$ ）：（a）2008 年 8 月 30 日 06 时；（b）2009 年 6 月 29 日 11 时；（c）2008 年 7 月 23 日 08 时；（d）2010 年 8 月 26 日 07 时

Fig.6 Examples of objective identification of DBV, 850 hPa streamline field (black line with arrows) and relative vorticity field (shading, units: $10^{-5}s^{-1}$): (a) 0600 UTC 30 August 2008; (b) 1100 UTC 29 June 2009; (c) 0800 UTC 23 July 2008; (d) 0700 UTC hours 26 August 2010.

为验证本文所发展的客观识别方法能否应用于不同区域的中尺度涡旋，随机选取 8 个月的 ERA5 资料（表 1），分别对高原涡、西南涡、大别山涡进行客观识别，并进行人工识别用以查验。识别区域如图 1 所示，高原涡中心层为 500 hPa，识别区域为 $78-103^{\circ}E$ ， $26-40^{\circ}N$ ，西南涡的识别区域为 $103-110^{\circ}E$ ， $28-34^{\circ}N$ ，大别山涡的识别区域为 $111-118^{\circ}$ ， $26-34^{\circ}N$ 。将人工识别结果（视为实况）与客观识别结果逐时次进行对比，当客观识别的涡旋中心位置与人工识别中心位置相差小于 100 km 时，认为客观识别准确。为评估本客观识别的效果，引入命中率（hit rate）；定义 $hit\ rate = N_H / N_T$ ，其中 N_T 为真实的涡旋（人工识别视为真实情况）时次数， N_H 为算法准确识别的涡旋时次数。由表 1 可

知，本方法的命中率均在 90%以上，平均命中率为 95.7%；就不同类型的涡旋而言，本识别算法对位于不同等压面层上的三类涡旋，都能够较准确的识别；就各时段的资料而言，客观识别命中率在不同的月份差异较小，识别效果比较稳定。由此可见，本识别方法能够准确地识别到中尺度气旋性环流并定涡旋的中心；同时本识别方法受时段、等压面的变化影响较小，可应用于多种中尺度涡旋的高精度识别。

表 2 不同资料下（ERA5，NCEP CFSR）的大别山涡客观识别算法评估，表中时次数为经人工查验真实的涡旋时次数

Table 2 The evaluation of the DBV objective identification based on ERA5 and NCEP CFSR reanalysis data, the occurrences in this table are the real DBV occurrences derived from manual detection.

大别山涡	ERA5		CFSR	
	时次数	命中率	时次数	命中率
2002 年 8 月	528	96.9%	55	92.7%
2008 年 6 月	436	94.6%	44	100%
2013 年 7 月	220	90%	24	91.7%

前人的研究结果表明（Neu et al., 2013；Shun-ichi et al., 2016），再分析资料的空间分辨是影响涡旋识别效果的重要因子之一。本文以大别山涡为例，随机选取 3 个月，分别使用 ERA5 资料 and 空间分辨率更粗的 CFSR 资料进行客观识别，以评估本文所发展中尺度涡旋客观识别算法对再分析资料空间分辨率的依赖性。如表 2 所示，在所选时段内，本文算法对基于 ERA5 和 CFSR 再分析资料的涡旋识别均有着超过 90%的准确率。由此可知，本识别方法对较高空间分辨率再分析资料的分辨率依赖性并不显著，能够适用于多种再分析资料（对于中尺度涡旋，建议使用 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ 或更高空间分辨率的再分析资料）。

综上所述，本文所发展的中尺度涡旋识别算法基本无等压面限制，对于高原涡，西南涡、大别山涡均能准确地进行识别并定位其涡旋中心；本识别方法基本不受所选时间段的影响，对不同月份的涡旋均能较准确地识别；对不同时空分辨率的资料，本方法的识别效果均较理想，基本可以代替人工识别。需要注意的是上述涡旋识别仅在源地范围内进行，对识别命中率的评估是基于涡旋时次进行的。

4 涡旋连续判定与三维追踪

4.1 涡旋连续判定

在涡旋追踪方面，前人大多采用 Blender（1997）提出的临近查找法，即在特征层上根据距离判断相邻时刻的涡旋是否为同一个涡旋。然而，在实际工作中，这种方法会造成一定程度的误判。这是因为用于进行距离判断的阈值主要是以涡旋可能出现的最大移速为上限。中尺度涡旋演变复杂，常常在局地相继快速生消，也在很多情况下出现多个距离相近的涡旋，因此，仅使用距离阈值进行判断可能会发生混淆。本文认为，除了涡旋移动距离需要在合理的范围之内，涡旋的演变也应具有一定的连续性，即相邻时次的涡旋环流特征应具有较高的相关性。因此，避免涡旋客观追踪时的误判，还需分析不同时次涡旋环流之间相关性。本文从相邻时刻涡旋的移距以及涡旋环流的相关性两方面来判断相邻时刻的涡旋是否为同一系统，即涡旋连续判定。

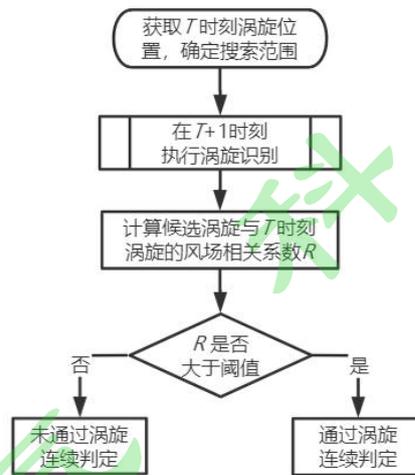


图 7 涡旋连续判定流程图

Pic.7 Flow chart of MV continuity recognition

依据涡旋的移速设置搜索半径 R_s ，以本文所使用的逐小时，水平分辨率为 0.25° 的 ERA5 资料为例，考虑单位时间分辨率内西风带气流影响下的涡旋运动最大距离， R_s 取 12 倍格距。以 T 时刻的涡旋中心 $O(i, j)$ 为中心，设定 R_s 为半径的矩形方框区域 $[i \pm R_s, j \pm R_s]$ 为搜索范围，在搜索范围内利用下一时刻 $T+1$ 的数据进行涡旋识别。定义 T 与 $T+1$ 时刻以涡旋中心为中心， R_s 为半径

的区域内风场的相关系数为： $R = (R_u + R_v)/2$ ，其中 R_u 和 R_v 分别为通过皮尔逊方法计算的相邻时刻纬向风场、经向风场的相关系数。这里以大别山涡为例说明相邻时刻风场相关系数阈值的取值方法。计算大样本大别山涡客观识别结果（表1中涡旋时次数共计1184次）的相邻时刻风场相关系数 R ，并选取合理的相关系数阈值。经计算，此1184时次大别山涡客观识别结果 R 值的第90%分位值为0.9，且表1中大别山涡客观识别的平均命中率为93.8%，与“90%分位”较吻合，故对大别山涡进行识别时取0.9作为相关系数阈值，即当风场相关系数 $R \geq 0.9$ 时，认为通过连续判定，由此可以将相邻时刻的涡旋识别结果归为同一涡旋。涡旋连续判定流程如图7所示，具体步骤如下：

(1) 根据 T 时刻涡旋所在位置和涡旋的移速确定搜索范围 $[i \pm R_s, j \pm R_s]$ ， $T+1$ 时刻在搜索范围内识别所有涡旋，如不存在涡旋，则认为 T 时刻为该涡旋生命史内最后一个时刻，否则定义所识别涡旋为候选涡旋并进入步骤(2)。

(2) 针对 $T+1$ 时刻得到的所有候选涡旋，逐个计算其与 T 时刻涡旋风场的相关系数 R （以两个时刻的涡旋中心为中心，半径为 R_s 的两个矩形框里进行计算），计其中相关系数最大涡旋的计算结果为 R ，若 $R \geq 0.9$ ，则认为此涡旋与之前涡旋是同一个，涡旋的移动方向由相邻时刻涡旋位移矢量求得，当 $R < 0.9$ ，认为二者不是同一涡旋系统， T 时刻为此涡旋生命史内最后一个时刻。

上述的涡旋连续判定，既可应用于涡旋水平追踪，即判断相邻时次的涡旋是否为同一系统；也可应用于垂直追踪，即判断相邻等压面层上的涡旋是否为同一系统。

4.2 涡旋三维追踪

基于本文提出的涡旋识别与连续判定，可以实现涡旋的水平追踪和垂直追踪。本文在水平追踪过程中，提出以特征层为主，以特征层相邻的上、下等压面层为辅助层的方式。这是因为涡旋是一个三维的系统，在涡旋（编号为 C ）的生命史中可能出现某些时刻（ T_n ）其垂直位置整体偏高（偏低）的情况，涡旋的最低（高）层高（低）于特征层，在随后的 T_{n+1} 时刻该涡旋又出现在特征

层上的情况。若仅在单一等压面上追踪，则会产生如下的误判： T_{n+1} 时刻在特征层上识别不到涡旋，认为涡旋 C 在 T_{n+1} 时刻消亡，而将在 T_{n+1} 时刻特征层上的涡旋误判为新生涡旋（编号为 $C+1$ ）。具体地，以使用 ERA5 资料追踪大别山涡为例，主要步骤如下：

（1）基于所研究时段的第 1 个时刻识别得到大别山地区（图 1 中间红框）850 hPa 上的所有中尺度涡旋。如果存在大别山涡（1 个或数个），则下载前 1 h 的 ERA5 再分析资料由研究时段的第 1 个时刻向前一时刻对上述所有的大别山涡逐个进行识别，对于其中的每个大别山涡，如果在前一时刻存在同一个大别山涡（即，该涡旋在 825 hPa、850 hPa、875 hPa 任一层上满足涡旋连续判定）则忽略该涡旋（因为它初生时段不在研究时段内），如果不存在同一个大别山涡，则认定其在研究时段的第 1 个时刻生成，标记其新生时刻 (T_0) 和位置 $O(i, j)$ 。如果在所研究时段的第 1 个时刻没有识别得到大别山涡，则继续向下一时刻识别，直至初次识别到大别山涡，并标记其新生时刻 (T_0) 和位置 $O(i, j)$ 。

（2）以涡旋新生位置 $O(i, j)$ 为基准，确定搜索范围 $[i \pm R_s, j \pm R_s]$ ，在后一时次 (T_1) 的特征层上的搜索范围内识别涡旋并执行涡旋连续判定。

（3）在此后的时次，在特征层上迭代执行步骤（2）直至追踪不到该涡旋。

（4）在辅助层上（对于大别山涡，辅助层为 825 hPa 和 875 hPa）进行涡旋识别和涡旋连续判定，若辅助层上识别到涡旋且通过涡旋连续判定，则将辅助层上涡旋中心位置赋值给特征层，在此后的时次执行步骤（2），若辅助层上识别不到涡旋，则该涡旋消亡，水平追踪结束。

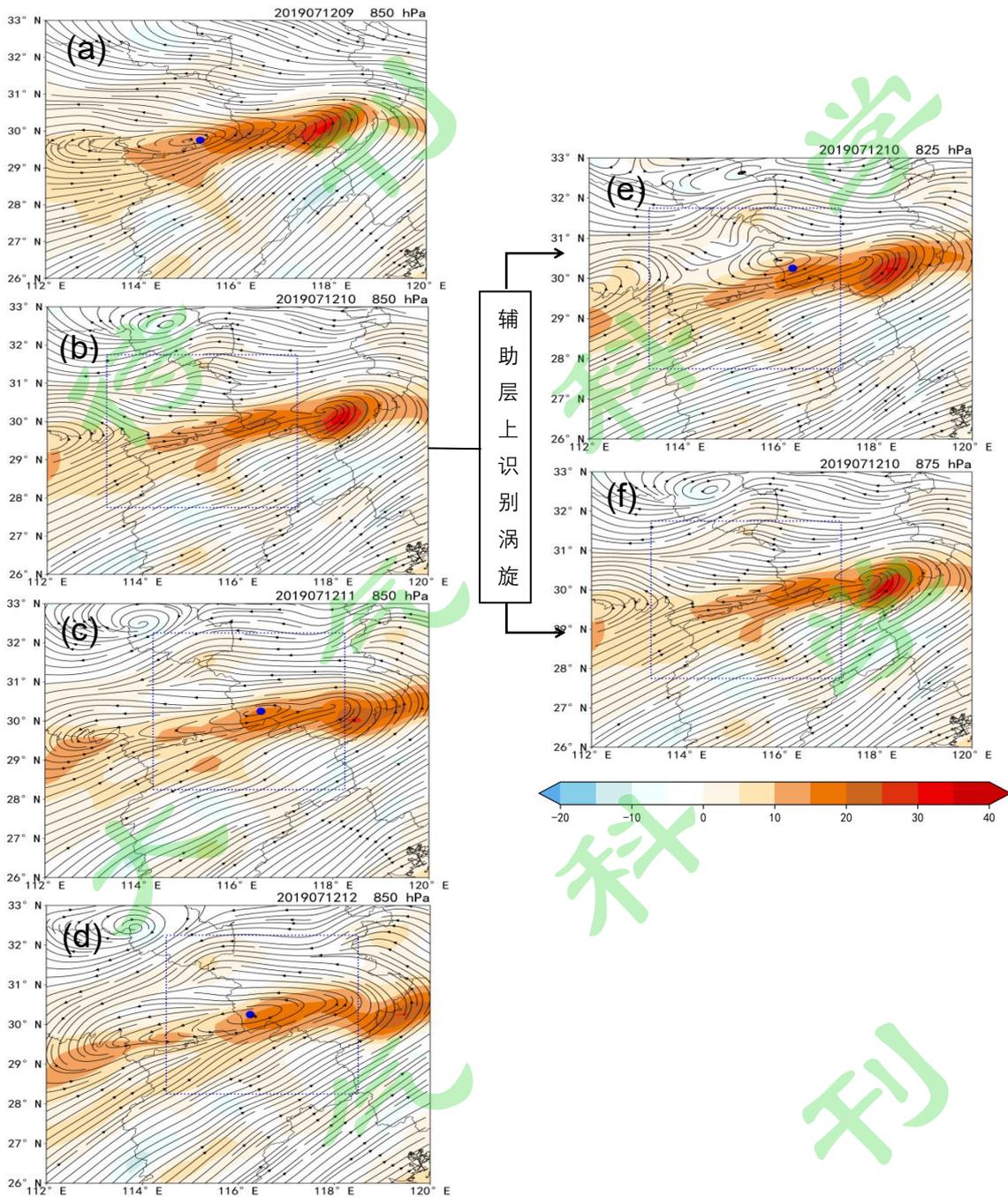


图 8 一次 DBV 的水平追踪示例，850 hPa 流场（黑色流线）和相对涡旋场（填色，单位： 10^{-5}s^{-1} ），蓝色虚线方框为搜索范围：（a-d）2019 年 7 月 12 日 09 时-12 时在 850 hPa 上追踪涡旋；（e）2019 年 7 月 12 日 10 时在 825 hPa 上识别涡旋；（f）2019 年 7 月 12 日 10 时在 875 hPa 上识别涡旋

Fig. 8 Horizontal tracking of a DBV, 850 hPa streamline field (black line with arrows) and relative vorticity field (shading, units: 10^{-5}s^{-1}), the blue dashed rectangles representing the search area: (a-d) the vortex tracking on 850 hPa from 0900 UTC to 1200 UTC 12 July 2019; (e) vortex searching on 825 hPa at 1000 UTC 12 July 2019; (f) vortex searching on 875 hPa at 1000 UTC 12 July 2019.

图 8 是一次 DBV 涡旋水平追踪的示例，图中蓝色方框为搜索范围。该涡旋生成于 2019 年 7 月 12 日 08 时（UTC），在 12 日 09 时涡旋中心位于 29.75°N ， 115.5°E ，当下一时次（12 日 10 时）继续在 850 hPa 上追踪该涡旋时，搜索范围内无涡旋，因此在辅助层 825 hPa 和 875 hPa 上追踪该涡旋。12 日 10 时，在 825 hPa 上可追踪到该涡旋，以图 8e 中涡旋中心位置确定下一时次的搜索范围，此后继续在 850 hPa 上追踪该涡旋直至消亡。由此，可以解决涡旋的突然中断问题，从而获取更准确的涡旋生命史和移动路径信息。

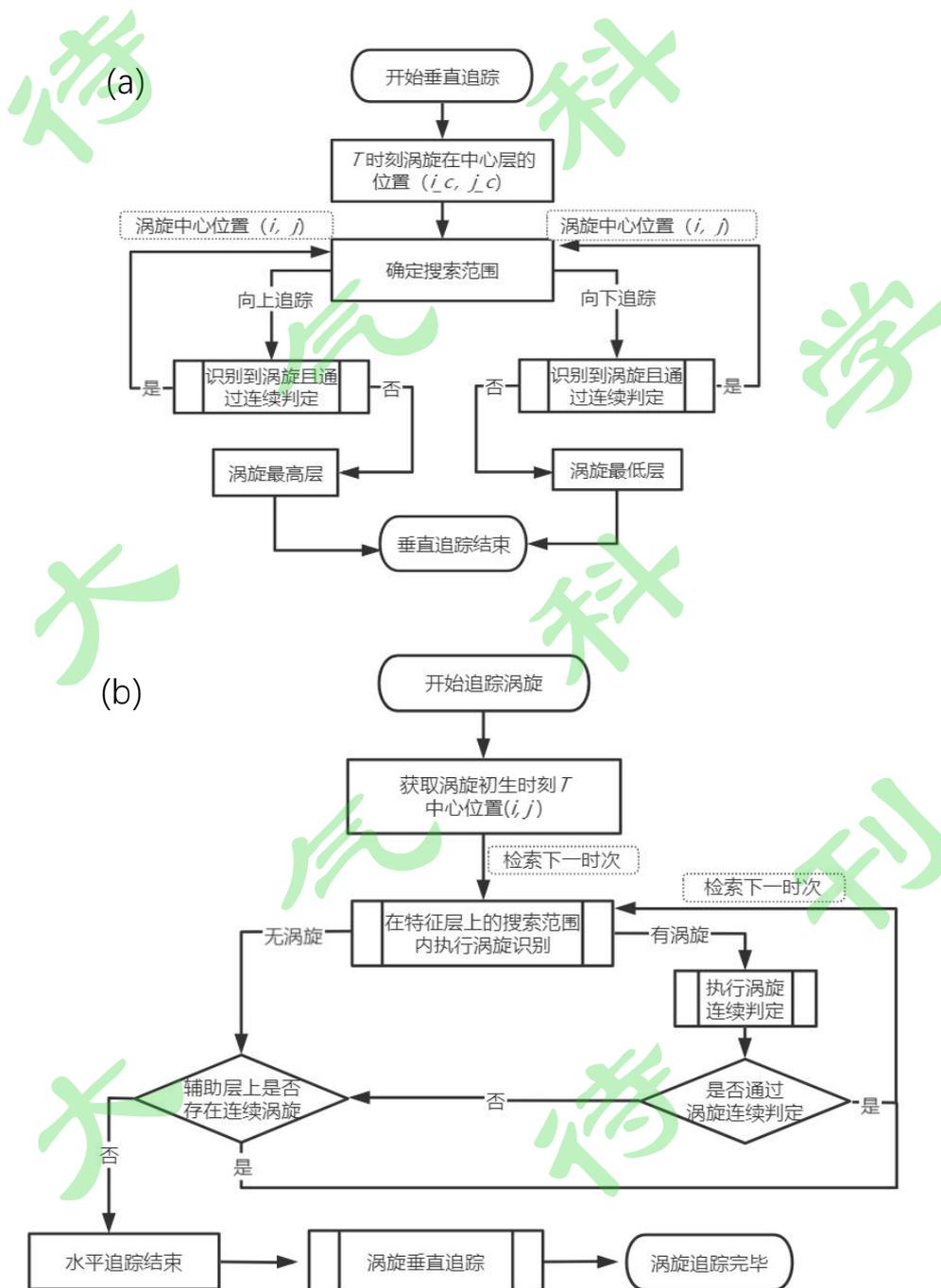


图 9 (a) 涡旋垂直追踪流程图；(b) 涡旋三维追踪流程图

Pic.9 (a) Flow chart of MV vertical tracking algorithm; (b) flow chart of MV 3D-tracking algorithm.

类似地，基于涡旋识别模块，涡旋连续判定模块，可以实现对涡旋生命时内任意时刻垂直追踪，进而实现对涡旋的三维追踪，涡旋垂直追踪和三维追踪流程如图 9 所示，其中垂直追踪中各等压面层上的搜索半径可取连续性判定中的 R_c 。图 10 展示了一次大别山涡垂直追踪示例，该涡旋生成于 2007 年 6 月 9 日 22 时（图略），在 10 日 11 时垂直伸展加深，通过涡旋垂直追踪，可以获取涡旋的垂直伸展层次及逐层的中心位置（图 10 中圆点为涡旋中心）。

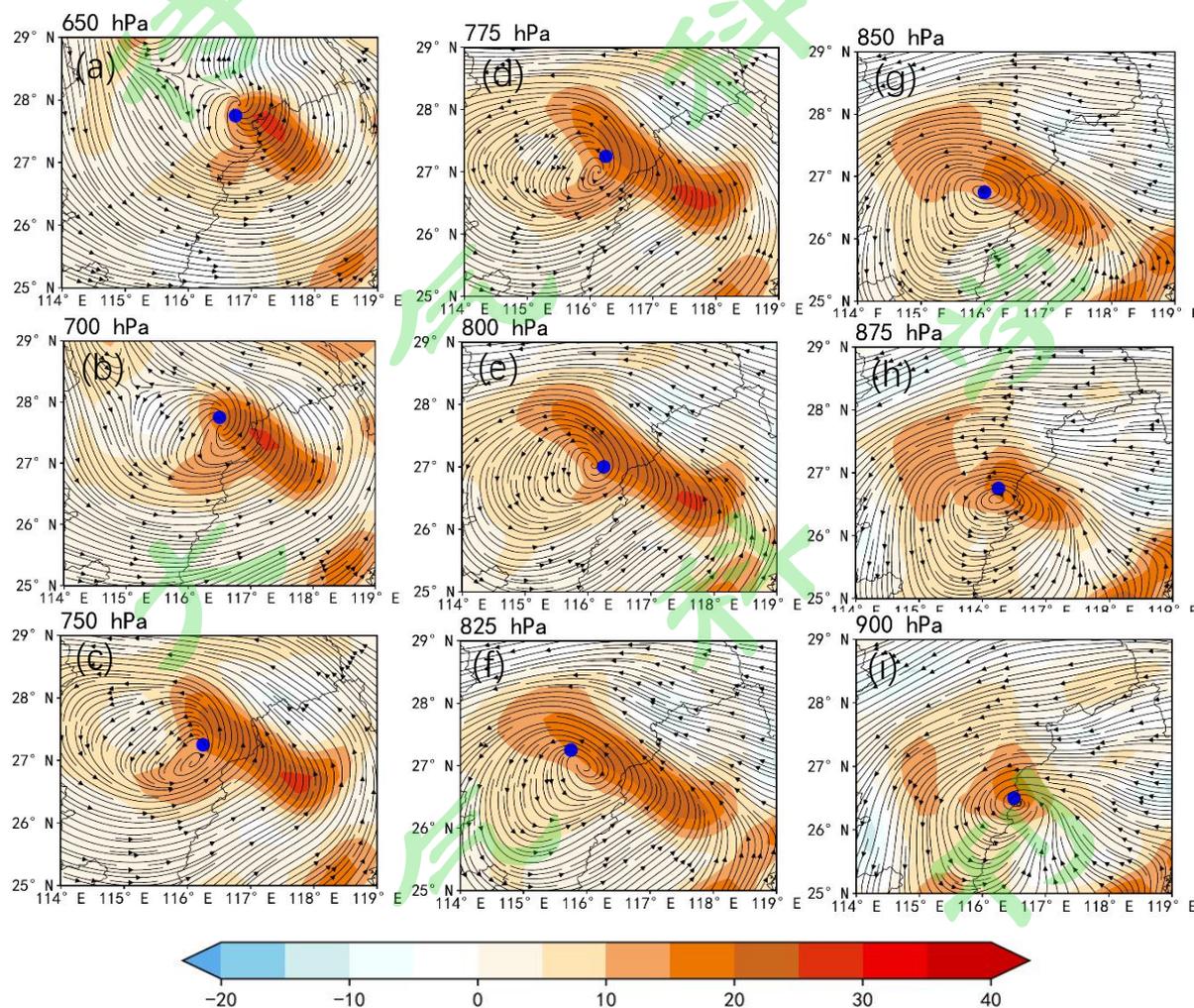


图 10 2007 年 6 月 10 日 11 时(世界时)大别山涡垂直追踪，流场（黑色流线）和相对涡旋场（填色，单位： $10^{-5}s^{-1}$ ）：（a~i）分别为 650 hPa~900 hPa 客观算法追踪的大别山涡，蓝色圆点为客观识别的涡旋中心

Fig. 10 Vertical tracking of a DBV at 1100 UTC 10 June 2007, streamline field (black line with arrows) and relative vorticity field (shading, units: $10^{-5}s^{-1}$). Panels (a-i) show the DBV from 650 hPa to 900 hPa tracked by the objective identification algorithm, the blue dots are the objectively identified DBV centers.

5 涡旋客观追踪算法的初步应用及效果分析

为了全面、客观地评估本文识别算法的性能，我们使用 1979-2020 年共 42 年暖季（5-9 月）大别山涡活动数据集进行系统的评估。此数据集的建立首先是使用本文所发展的客观识别算法对此时段内的大别山涡进行识别，之后对所识别得到的涡旋进行逐一查证，从而确保所识别的结果为真实的大别山涡。在 42 个暖季中，共识别得到 3722 个大别山涡，共计 36357 时次。由表 3 可知，本文算法的平均命中率为 95.5%，因此本客观追踪算法准确率较高，具备替代人工识别的能力。通过对比同年份的源地内涡旋识别命中率可以发现，涡旋追踪命中率往往更高，这意味着对于能够移出源地的 DBV，客观识别和追踪的准确率更高。移出源地的 DBV 往往具有更长的生命史和更显著的气旋性环流，因此本方法对较强的涡旋应用效果非常好，对环流较弱的涡旋应用效果稍差。

表 3 1979-2020 年暖季大别山涡源地内客观识别算法命中率和涡旋追踪方法命中率， N_T 为经人工查验真实的涡旋时次数

Table 3 The objective identification hit rate in which identification is performed in DBV source region and the DBV tracking hit rate during the warm season of 1979-2020, N_T is the real DBV occurrences derived from manual detection.

年份	源地内识别命中率 (NT)	涡旋追踪命中率 (NT)	年份	源地内识别命中率 (NT)	涡旋追踪命中率 (NT)
1979	92.8% (510)	95.5% (737)	2000	81.1% (397)	96.0% (474)
1980	89.8% (696)	93.1% (962)	2001	89.3% (702)	97.5% (879)
1981	93.0% (584)	93.6% (611)	2002	93.1% (755)	94.9% (1001)
1982	86.5% (613)	97.2% (776)	2003	91.7% (567)	96.3% (729)
1983	85.5% (621)	92.3% (883)	2004	90.3% (575)	97.6% (832)
1984	94.4% (551)	92.7% (656)	2005	85.7% (561)	92.4% (708)
1985	89.9% (534)	96.2% (656)	2006	93.5% (445)	97.6% (542)
1986	88.0% (664)	89.5% (893)	2007	92.0% (574)	97.2% (941)
1987	95.4% (843)	95.5% (995)	2008	98.7% (625)	98.1% (751)
1988	89.3% (543)	93.9% (904)	2009	97.8% (490)	97.2% (651)
1989	94.0% (413)	94.6% (649)	2010	97.2% (612)	93.2% (983)
1990	93.2% (455)	95.8% (687)	2011	87.2% (584)	92.9% (657)
1991	90.8% (477)	97.5% (822)	2012	98.4% (621)	96.0% (782)
1992	89.3% (497)	94.4% (761)	2013	88.6% (579)	97.4% (725)
1993	95.9% (737)	94.3% (936)	2014	97.3% (701)	97.4% (1032)
1994	83.8% (463)	95.5% (582)	2015	91.5% (898)	96.2% (1074)
1995	81.1% (449)	94.1% (523)	2016	94.4% (626)	94.7% (793)
1996	95.1% (567)	96.2% (814)	2017	94.6% (669)	97.7% (899)
1997	98.2% (757)	98.4% (955)	2018	91.7% (448)	98.4% (608)
1998	92.7% (606)	95.7% (862)	2019	93.1% (734)	95.9% (947)
1999	87.3% (723)	95.7% (897)	2020	94.2% (701)	96.2% (1056)

为分析涡旋追踪算法失误的原因，引入空报率和漏报率，空报率 $\text{false rate} = N_F / N_T$ ，漏报率 $\text{miss rate} = N_M / N_T$ 。其中 N_F 为算法空报的次数，若某时刻程序识别到涡旋而人工查验不存在涡旋，记为空报； N_M 为算法漏报的次数，若人工查验存在涡旋而程序未能准确识别涡旋（包括程序未识别到涡旋和程序识别的涡旋中心位置较实际偏差大于 1° 两种情况），记为漏报。定义失误率（ error rate ）为空报率和漏报率之和，失误率整体反映了算法识别失误的比例。图 11 (a) 为 1979-2020 年 5-9 月涡旋自动追踪算法的命中率和失误率，42 年平均命中率为 95.5%，其中 1997 年命中率最高，为 98.4%，2018 年次之，命中率为 98.4%，1986 年最低，为 89.5%。42 年平均失误率为 10.8%，2008 年失误率最低，失误率为 4.39%。值得注意的是 1993 年、1995 年和 2012 年的命中率分别为 94.3%、94.1%、96%，但其失误率均超过 14%，因此较高的命中率的并不一定对应较低的失误率。图 11 (b) 为 1979-2020 年 5-9 月的空报率和漏报率，由图可知空报率和漏报率的占比在各年中存在显著差异，如 1997 年，空报率（8.7%）为漏报率（1.6%）的 5.5 倍，而 2011 年，空报率（0.9%）则为漏报率（7.2%）的 0.12 倍，这意味着本算法的应用效果在一定程度上受各年整体环流形势的影响，与涡旋自身的属性相关，对较强的涡旋识别效果好，而对较弱的涡旋识别效果稍差。从命中率，空报率，漏报率的整体分布上（图 11c），命中率集中分布在 94%~97%，空报率集中分布在 4.5%~8%，漏报率集中分布在 2.8%~5.5%，这表明本涡旋追踪算法在 42 年间的应用效果比较稳定，均有较高的命中率，且空报率和漏报率均控制在较低的范围内，这一效果显著超过了传统算法的水平（Fu et al., 2020）。

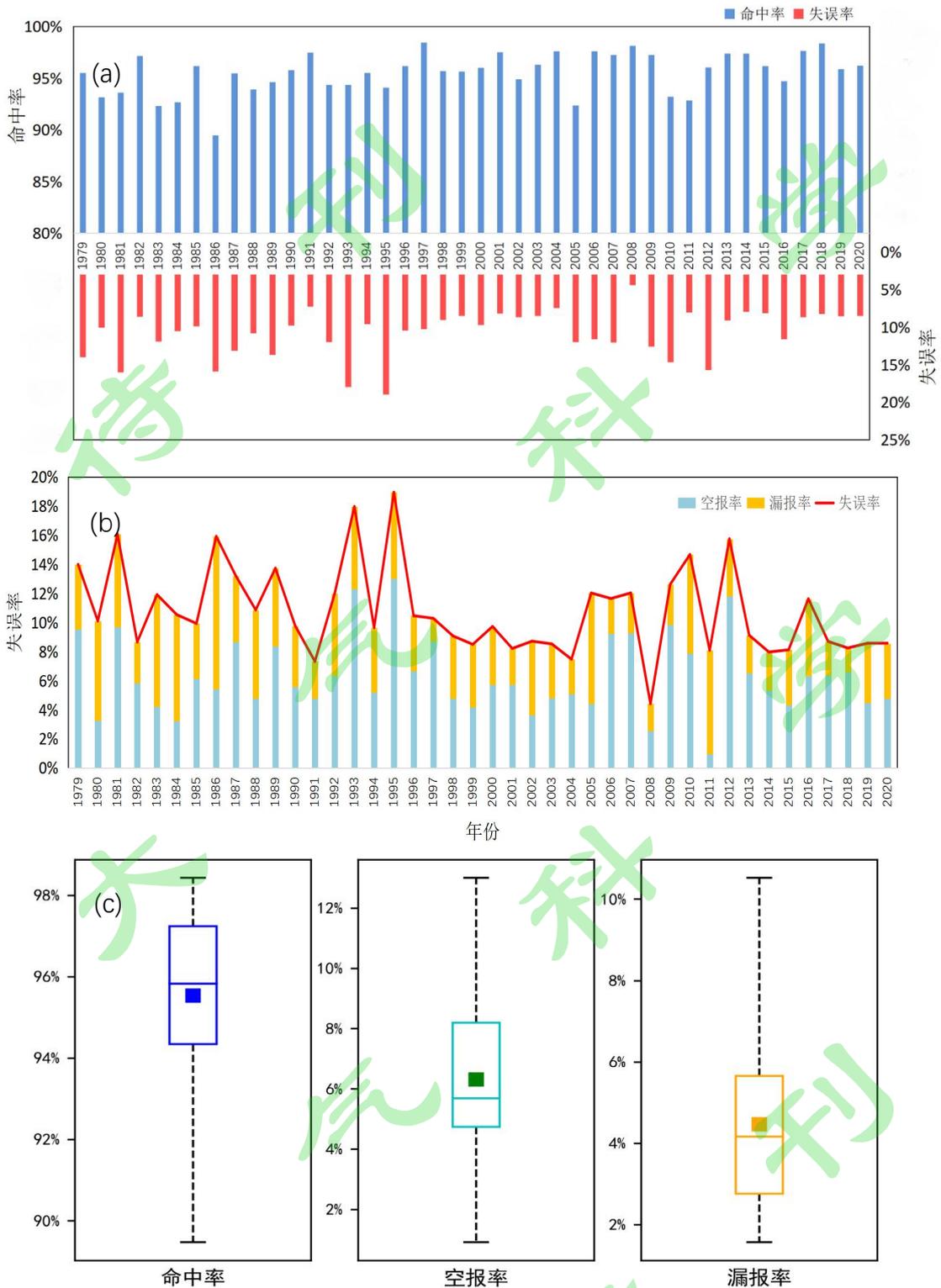


图 11 1979-2020 年暖季大别山涡客观识别算法的效果评估：(a) 命中率（蓝色柱状）和失误差率（红色柱状）的逐年分布；(b) 空报率（蓝色柱状）和漏报率（黄色柱状）的逐年分布，图中折线为失误差率；(c) 命中率、空报率、失误差率箱线图，箱体表示 25%分位~75%分位，箱体中的横线代表中位数，矩形方框代表平均值

Fig. 11 The quantitative evaluation of the objective identification algorithm performed on DBV during the warm season of 1979-2020: (a) hit rate (blue bars) and error rate (red bars); (b) the distribution of miss rate (blue bars) and false rate (red bars), with red fold line indicating the error

rate; (c) box-and-whisker plot of hit rate, false rate, and miss rate, with the lower and upper whiskers representing the minima and maxima value, the boxes covering the 25th-75th percentiles, the horizontal line in the box representing the median, and the rectangular box representing the average.

6 结论与讨论

中尺度涡旋是产生灾害天气的最主要天气系统之一，对之开展研究十分必要。我国长江流域频发三类中尺度涡旋，它们在暖季频繁出现并引发我国长江流域及其周边地区暴雨、大风、闪电等灾害天气。深入的统计分析是全面认识此类涡旋的关键，这需要高准确率涡旋客观识别算法的支撑。现有的涡旋客观识别算法多以较粗分辨率的再分析数据为基础且存在较显著的空报与漏报。为提高我国中尺度涡旋识别的准确率，解决现有客观识别方法的不足，本文提出了一种新的中尺度涡旋客观识别算法，它主要包括识别中尺度气旋性闭合环流、确定涡旋中心位置二个步骤。

本文基于 1979-2020 年共 42 年暖季（5-9 月）共计 36357 时次大别山涡的活动数据集对新发展的中尺度涡旋客观识别算法进行了定量评估。结果表明，新发展的中尺度涡旋客观识别算法具有涡旋识别准确率高，涡旋中心定位精度高的特点，并在一定程度上降低了误识别与漏识别的比例，较现存方法有显著优势。对 42 个暖季内大别山涡的识别效果表明，本算法的平均命中率为 95.5%，平均空报率为 6.3%，平均漏报率为 4.5%，基本解决了不规则形状涡旋（如，狭长形态涡旋、长轴倾斜型涡旋等）识别准确率低的问题。本识别算法对再分析资料的空间分辨率依赖性不显著（ 0.5° 或 0.25° ），能够适用于多种再分析资料，其识别过程无需人工干涉，基本无等压面限制，不受所选时间段的影响，对不同月份的高原涡、西南涡、大别山涡均取得了较好的识别效果。

本文提出了涡旋连续判定的方法，并基于此发展了以特征层为主，临近层为辅结合涡旋风场相关系数的中尺度涡旋水平追踪方法，这比目前主流的涡旋临近追踪法拥有了更高的准确率。此外，基于涡旋连续判定与涡旋风场相关系数，本文发展了涡旋的垂直追踪方案，实现了中尺度涡旋的垂直向追踪（用于确定涡旋的垂直伸展）。

需要指出的是，本算法仍存在一定的漏报与空报现象，漏报现象主要与较

弱以及形状极不规则的涡旋相联系，空报主要由于涡旋的形状不规则所致。在涡旋的追踪方面，同一时刻出现多个涡旋中心的情况仍会在一定程度上导致涡旋的水平追踪出错。由上可知，涡旋本身的属性（强、弱、形状等）是影响本识别算法准确率的关键因子。除涡旋本身属性外，资料的分辨率也在一定程度上影响识别效果，对于较弱涡旋，形态不规则涡旋，使用高分辨的数值模式结果可得到更完整的信息，本识别算法的准确率也会有所提高。此外，本算法尚未实现对涡旋半径的估计，也不能定量确定涡旋的强度和影响范围，而这些特征都是认识涡旋的关键。综合上述，将来仍需进一步深入研究来提高本算法对中尺度涡旋识别与追踪的准确率，并且需要发展新方法在涡旋识别与追踪的过程中确定涡旋的关键属性。

参考文献 (References)

- Allen J T, Giammanco I M, Kumjian M R, et al. 2020. Understanding hail in the Earth system[J]. *Rev. Geophys.*, 58(1): 8755-1209.
- Bartels D L, Maddox R A, 1991: Midlevel cyclonic vortices generated by mesoscale convective systems[J]. *Mon. Wea. Rev.*, 119: 104-118. doi:10.1175/1520-0493(1991)119,0104:MCVGBM.2.0.CO;2.
- Bovalo C, Barthe C, Yu N, et al. (2014). Lightning activity within tropical cyclones in the south west Indian Ocean[J]. *Geophys. Res. Atmos.*, 119:8231–8244.
- Cheng Xiaolong, Li Yueqing, Xu Li. 2016. An analysis of an extreme rainstorm caused by the interaction of the Tibetan Plateau vortex and the Southwest China vortex from an intensive observation [J]. *Meteor. Atmos. Phys.*, 128(3): 373–399. doi: 10.1007/s00703-015-0420-2
- Davis C A, Ahijevych D A, Trier S B. 2002. Detection and Prediction of Warm Season Midtropospheric Vortices by the Rapid Update Cycle, *Monthly Weather Review*, 130(1): 24-42.
- Feng X Y, Liu C H, Fan G Z, et al. 2016. Climatology and structures of southwest vortices in the NCEP Climate Forecast System Reanalysis[J]. *Journal of Climate*, 29(21):7675-7701.
- Fu S M, Zhang J P, Sun J H, et al. 2016. Composite analysis of long-lived mesoscale vortices over the middle reaches of the Yangtze River valley: Octant features and evolution

- mechanisms[J]. *Journal of Climate*, 29, 761-781.
- Fu S M, Sun J H, Luo Y L, et al. 2017. Formation of long-lived summertime mesoscale vortices over central east China: Semi-idealized simulations based on a 14-year vortex statistic[J]. *Atmos. Sci.*, 74, 3955-397.
- Fu S M, Zhang J P, Tang H, et al. 2020. A new mesoscale-vortex identification metric: restricted vorticity and its application [J]. *Environ. Res. Lett.*, 15. doi: 10.1088/1748-9326/abcac6.
- Grunzke C T, Evans C. 2017. Predictability and dynamics of warm-core mesoscale vortex formation with the 8 May 2009 “Super Derecho” event. *Mon. Wea. Rev.*, 145: 811–832.
- Holton J R. 2004. *An Introduction to Dynamic Meteorology*. 4th ed. Academic Press, 552 pp.
- Hodges K I, Hoskins B J, Boyle J et al. 2003. Comparison of recent reanalysis datasets using objective feature tracking: storm tracks and tropical easterly waves *Mon. Weather Rev.* 131 2012–37
- Li L, Zhang R H, Wen M. 2014. Diurnal variation in the occurrence frequency of the Tibetan Plateau vortices [J]. *Meteor. Atmos. Phys.*, 125(3-4): 135-144. doi: 10.1007/s00703-014-0325-5
- Neu, Urs, and Akperov, Mirseid G, et al. 2013. IMILAST A Community Effort to Intercompare Extratropical Cyclone Detection and Tracking Algorithms [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 94(4): 529-547. doi:10.1175/BAMS-D-11-00154.1
- Orlanski I. 1975. A rational subdivision of scales for atmospheric processes[J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 56, 527–530.
- Qian W, Quan L, Shi S. 2002. Variations of the dust storm in China and its climatic control[J]. *Journal of Climate*, 15, 1216–1229.
- Blender R, Fraedrich K, Lunkeit F. 1997. Identification of cyclone-track regimes in the North Atlantic [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 123(539): 727-741. doi: 10.1002/qj.49712353910
- Shen H F, Zhai G Q, Zhu Y, et al. 2012. Numerical study of a mesoscale vortex in the planetary boundary layer of the Meiyu front[J]. *Acta Meteor. Sinica*, 26 (6):788-802.
- Tao S Y, Ding Y H. 1981. Observational evidence of the influence of the Qinghai-Xizang (Tibet) Plateau on the occurrence of heavy rain and severe convective storms in China[J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 62(1): 23-30. doi: 10.1175/1520-0477(1981)062<0023:OEOTIO>2.0.CO;2

- Wang Q W, Tan Z M. 2014. Multi-scale topographic control of southwest vortex formation in Tibetan Plateau region in an idealized simulation[J]. *J. Geophys. Res.: Atmos.*, 119(20): 11543–11561. doi: 10.1002/2014JD021898
- Xu W H, Ni Y Q, Wang X K, et al. 2011. A study of structure and mechanism of a meso-beta-scale convective vortex and associated heavy rainfall in the Dabie Mountain area, Part I: Diagnostic analysis of the structure[J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 28: 1159-1176.
- Zhang Y C, Sun J H, Fu S M. 2014. Impacts of diurnal variation of mountain–plain solenoid circulations on precipitation and vortices East of the Tibetan Plateau during the Mei-yu season [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 31(1): 139–153. doi: 10.1007/s00376-013-2052-0
- 陈启智, 黄奕武, 王其伟, 等. 2007. 1990~2004年西南低涡活动的统计研究[J]. *南京大学学报(自然科学版)*, 43(6):633-642. doi: 10.3321/j.issn:0469-5097.2007.06.008
- Chen Qizhi, Huang Yiwu, Wang Qiwei, et al. 2007. The statistical study of the southwest vortices during 1990-2004[J]. *Journal of Nanjing University (Natural Sciences) (in Chinese)*, 43(6):633-642. doi: 10.3321/j.issn:0469-5097.2007.06.008
- 陈忠明, 闵文彬. 2000. 西南低涡的统计研究[G]//第二次青藏高原大气科学试验理论研究进展(二). 北京:气象出版社, 368-378. CHEN Zhongming, Min Wenbin. 2000. Statistical research on the Southwest Vortex[G]// Research progress of theory of the second Tibetan Plateau scientific experiments. Beijing: Chinese Meteorological Press (in Chinese), 2000: 368-378.
- 谌贵珣, 何光碧. 2008. 2000~2007年西南低涡活动的观测事实分析[J]. *高原山地气象研究*, 28(4):59-65. Shen Guixun, He Guangbi. 2008. The observed facts analysis of Southwest Vortex from 2000-2007[J]. *Plateau and Mountain Meteorology Research(in Chinese)*, 28(4):59-65.
- 高坤, 徐亚梅. 2001. 1999年6月下旬长江中下游梅雨锋低涡扰动的结构研究[J]. *大气科学*, 25(6): 740-756. doi: 10.3878/j.issn.1006-9895. Gao Kun, Xu Yamei. A Simulation Study of Structure of Mesovortices along Mei-yu Front during 22 ~ 30 June 1999[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2001, 25(6): 740-756. doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2001.06.02
- 高守亭, 周玉淑. 2019. 近年来中尺度涡动力学研究进展[J]. *暴雨灾害*, 38(5): 431-439. Gao Shouting, Zhou Yushu. 2019. Progress in dynamics of mesoscale vortex in recent

- years[J]. *Torrential Rain and Disasters*, 38(5): 431-439. DOI: 10.3969/j.issn.1004-9045.2019.05.005.
- 高正旭, 王晓玲, 李维京. 2009. 西南低涡的统计特征及其对湖北降水的影响[J]. *暴雨灾害*, 28(4): 302-305. Gao Zhengxu, Wang Xiaoling, Li Weijing. 2009. The statistic characteristics of southwest China vortex and its effect on precipitation of Hubei Province [J]. *Torrential Rain Disasters (in Chinese)*, 28 (4): 302-305.
- 谷文龙. 2008. 长江下游梅雨锋中尺度涡旋统计分析与模拟研究[D]. 南京信息工程大学硕士学位论文. Gu Wenlong. 2008. Statistical and simulative analysis of mesoscale vortexes on Meiyu front over lower reaches of Yangtze River[D]. M.S. thesis (in Chinese), Nanjing University of Information Science and Technology.
- 何光碧. 2012. 西南低涡研究综述[J]. *气象*, 38(02):155-163. HE Guangbi. 2012. Review of the Southwest vortex research[J]. *Meteorological Monthly (in Chinese)*, 38(2): 155-163.
- 胡伯威, 潘鄂芬. 1996. 梅雨期长江流域两类气旋性扰动和暴雨[J]. *应用气象学报*, 7(2):138-144. Hu Bowei, Pan E'fen. 1996. Two kinds of cyclonic disturbances and their accompanied heavy rain in the Yangtze River valley during the Mei-yu period[J]. *Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese)*, 7 (2):138-144.
- 李国平, 陈佳. 2018. 西南涡及其暴雨研究新进展[J]. *暴雨灾害*, 37(4): 293-302. Li Guoping, Chen Jia. 2018. New progresses in the research of heavy rain vortexes formed over the Southwest China [J]. *Torrential Rain and Disasters (in Chinese)*, 37(4): 293-302. doi: 10.3969/j.issn.1004-9045.2018.04.001
- 李国平. 2002. 青藏高原动力气象学[M]. 北京: 气象出版社, 78-79. Li Guoping. 2002. *Dynamic Meteorology of the Tibetan Plateau (in Chinese)* [M]. Beijing: China Meteorological Press, 78-79.
- 李跃清, 徐祥德. 2016. 西南涡研究和观测试验回顾及进展[J]. *气象科技进展*, 6(3): 134-140. Li Yueqing, Xu Xiangde. 2016. A review of the research and observing experiment on southwest China vortex [J]. *Advances in Meteorological Science and Technology (in Chinese)*, 6(3): 134-140.
- 卢敬华. 1986. 西南低涡概论[M]. 北京: 气象出版社, 276pp. Lu Jinghua. 1986. *An Introduction to Southwest Vortexes (in Chinese)*[M]. Beijing: China Meteorological Press, 276pp.

- 马勋丹, 智协飞, 王静, 等. 2018. 1979–2016 年夏季西南涡活动及其与降水的关系[J]. 大气科学学报, 41(2): 198–206. Ma Xudan, Zhi Xiefei, Wang Jing, et al. 2018. Analysis of the Southwest vortex activities in summer and their relationship with precipitation during the period of 1979-2016[J]. Transactions of Atmospheric Sciences (in Chinese), 41(2): 198–206. doi: 10.13878/j.cnki.dqkxxb.20171015001
- 沈杭锋, 翟国庆, 尹金方, 等. 2013. 长江下游梅汛期尺度涡旋特征分析[J]. 大气科学, 37(4):923-932. Shen Hangfeng, Zhai Guoqing, Yin Jinfang, et al. 2013. Feature analysis of mesoscale vortex over lower reaches of Yangtze River during Meiyu period [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 37 (4):923-932.
- 王金虎, 李栋梁, 王颖. 2015. 西南低涡活动特征的再分析[J]. 气象科学, 35(2): 133–139. doi: 10.3969/2014jms.0039 Wang Jinhua, Li Dongliang, Wang Ying. 2015. Characteristics reanalysis on Southwest vortex [J]. Journal of the Meteorological Sciences (in Chinese), 35(2): 133–139. doi: 10.3969/2014jms.0039
- 王鑫, 李跃清, 郁淑华, 等. 2009. 青藏高原低涡活动的统计研究[J]. 高原气象, 28 (1):64-71. <http://www.cnki.com.cn/Article/CJFDTOTAL-GYQX200901008.htm>. Wang Xin, Li Yueqing, Yu Shuhua, et al. 2009. Statistical study on the plateau vortex activities [J]. Plateau Meteor. (in Chinese), 28 (1):64-71. <http://www.cnki.com.cn/Article/CJFDTOTAL-GYQX200901008.htm>
- 杨引明, 谷文龙, 赵锐磊, 等. 2010. 长江下游梅雨期低涡统计分析[J]. 应用气象报, 21: 11-18. Yang, Yinming, Gu wenlong, Zhao Ruilei, et al., 2010: The statistical analysis of low vortex during Meiyu season in the lower reaches of the Yangtze [J]. Appl. Meteor. Sci., 21: 11–18.
- 叶瑶, 李国平. 2016. 近 61 年夏半年西南低涡的统计特征与异常发生的流型分析 [J]. 高原气象, 35(4): 946–954. Ye Yao, Li Guoping. 2016. Statistics characteristics and the abnormal development of flow pattern of the southwest vortex in recent 61 summer half years [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 35(4): 946–954. doi: 10.7522/j.issn.1000-0534.2015.00073
- 郁淑华, 高文良. 2006. 高原低涡移出高原的观测事实分析[J]. 气象学报, 64 (3):392-399. doi: 10.3321/j.issn:0577-6619.2006.03.014 Yu Shuhua, Gao Wenliang. 2006. Observational analysis on the movement of vortices before/after moving out the Tibetan Plateau[J]. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 64 (3):392-399, doi: 10.3321/j.issn:0577-6619.2006.03.014.

- 郁淑华, 高文良, 彭骏. 2012. 青藏高原低涡活动对降水影响的统计分析 [J]. 高原气象, 31(3): 592-604. Yu Shuhua, Gao Wenliang, Peng Jun. 2012. Statistical analysis on influence of Qinghai-Xizang Plateau vortex activity on precipitation in China [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 31(3): 592-604.
- 张敬萍, 傅慎明, 孙建华, 等. 2015. 夏季长江流域两类中尺度涡旋的统计与合成研究[J]. 气候与环境研究, 20(3): 319-336. Zhang, Jingping, Fu Shenming, Sun Jianhua, et al. 2015. A statistical and compositional study on the two types of mesoscale vortices over the Yangtze River Basin [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 20(3), 319-336.
- 张元春, 孙建华, 傅慎明. 2012. 冬季一次引发华北暴雪的低涡涡度分析[J]. 高原气象, 31(2): 387-399. Zhang Yuanchun, Sun Jianhua, Fu Shenming. 2012. Analysis of vorticity during vortex producing snowstorm in North China in Winter[J]. Plateau Meteor., 31, 387-399.
- 周玉淑, 李柏. 2010. 2003年7月8~9日江淮流域暴雨过程中涡旋的结构特征分析[J]. 大气科学, 34(3):629-639. Zhou Yushu, Li Bai. 2010. Structural analyses of vortex causing torrential rain over the Changjiang-Huaihe River basin during 8 and 9 July 2003 [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 34(3):629-639.

游 刊 刊 游
科 科 科 科
游 游 游 游
刊 刊 刊 刊
游 游 游 游