

李春虎,李峰,任健,等.2011.涡旋自组织在山东暴雨预报中的应用研究[J].大气科学学报,34(1):43-51.

Li Chun-hu, Li Feng, Ren Jian, et al. 2011. The application of vortex self-organization in the heavy rainstorm prediction in Shandong Province [J]. Trans Atmos Sci, 34(1):43-51.

## 涡旋自组织在山东暴雨预报中的应用研究

李春虎<sup>1,2</sup>, 李峰<sup>2</sup>, 任健<sup>3</sup>, 杨芙蓉<sup>4</sup>, 马革兰<sup>1</sup>

(1. 南京信息工程大学 遥感学院, 江苏 南京 210044; 2. 山东省气象局, 山东 济南 250031;  
3. 济南市气象局, 山东 济南 250002; 4. 襄樊市气象局, 湖北 襄樊 441021)

**摘要:**分析 2000—2007 年夏季卫星云图资料发现,在山东省区域性或大范围暴雨天气过程中,一些产生暴雨的中尺度云团的发展演变经历了由无组织到有组织、由不规则云形到规则云形的过程。为了更加凸现这种演变特征,对 6 例典型天气过程进行了分析。结果表明:造成山东暴雨的云团自组织过程多发生在 7 月;初始云块平均为 5 个左右;云团之间平均距离为 200 km 左右;源地多发生在山东、河南、河北三省交界及鲁西地区;1 h 最强降水一般出现在自组织完成时刻或其前后 3 h 左右;云团从初始生成到自组织并直至消亡,整个过程约 11 h。

**关键词:**涡旋自组织;暴雨;预报

**中图分类号:**P457.6 **文献标识码:**A **文章编号:**1674-7097(2011)01-0043-09

## The application of vortex self-organization in the heavy rainstorm prediction in Shandong Province

LI Chun-hu<sup>1,2</sup>, LI Feng<sup>2</sup>, REN Jian<sup>3</sup>, YANG Fu-rong<sup>4</sup>, MA Ge-lan<sup>1</sup>

(1. School of Remote Sensing, NUIST, Nanjing 210044, China; 2. Shandong Meteorological Bureau, Jinan 250031, China;  
3. Jinan Meteorological Bureau, Jinan 250002, China; 4. Xiangfan Meteorological Bureau, Xiangfan 441021, China)

**Abstract:** By analyzing the summer satellite data from 2000 to 2007, it shows that some of mesoscale cloud clusters resulting in regional or largescale rainstorm in Shandong province experience the process from non-organized system to organized system, from irregular cloud pattern to regular cloud pattern. To study the features of the evolution, six typical events are studied. The results show that the cloud clusters self-organization causing the heavy rainstorm in Shandong province occurs in July, there are 5 pieces of cloud clusters on average at the beginning, the average distance between the cloud clusters is 200 km, most cloud clusters build in the west of Shandong province and in the boundary of Shandong, Henan and Hebei provinces, the 1-hr strongest precipitation generally happens within three hours before or after the completion of self-organization, and the cloud clusters lasts for about 11 hours from building over self-organization to extinction.

**Key words:** vortex self-organization; rainstorm; prediction

## 0 引言

山东濒临黄海、渤海,跨黄河、淮河、海河三大流域,是自然灾害多发频发省份之一。夏季的暴雨、短

历时强降水往往造成严重损失。经济社会的发展和防灾减灾工作对气象工作提出了更高要求,灾害性天气预报水平则是当前天气预报业务中最重要的也是最需要提高的环节。

收稿日期:2010-06-17;改回日期:2010-10-12

基金项目:国家自然科学基金资助项目(40775038;40333028);上海台风基金项目(20060601)

作者简介:李春虎(1960—),男,江苏靖江人,博士生,高级工程师,研究方向为台风动力学,lichhgsm@tom.com.

山东夏季的暴雨以 7 月最多(蒋伯仁等, 2005), 近年来关于山东夏季暴雨的研究有很多, 研究工作涉及暴雨的分类、气候特征、影响系统、不同尺度天气系统的相互作用、物理量诊断分析以及暴雨的预报方法(曹钢锋等, 1988; 张经珍等, 1998; 李昌义等, 1999; 闫丽凤等, 1999; 李昌义, 2000; 李昌义等, 2000a, 2000b, 2000c; 刘文等, 2003)。

将自组织理论应用于大气科学, 以自组织物理模型研究台风涡旋的发生和发展, 大大地拓宽了人们认识若干重要观测现象的思路和方法。涡旋自组织是 2003 年国际涡旋动力学会议的第一优先专题, 受到国内外科学界越来越多的重视(周嘉陵等, 2006a, 2006b)。多个涡旋或涡块合并的现象往往与强降水天气灾害有着密切联系(周秀骥等, 2006)。

涡旋自组织, 指的是初始时刻两个或多个涡旋, 经过一段时间的演变, 合并形成一个尺度更大的涡旋。该涡旋不是受外力强迫生成的, 而是自发生成的, 自发生成的主要机制是非线性的相互作用(陈联寿和丁一汇, 1979)。

罗德海(1997)、罗哲贤(1989)在弱非线性的框架内分析了阻塞高压的动力学。近来, 在强非线性的框架内, 关于涡旋自组织的研究, 已有一系列的结果提出。周秀骥等(2006)在模式初始场上放置两个相同尺度的涡, 双涡逆时针互旋, 其终态仍然是两个分离的涡; 若在双涡之间加进一个小尺度的涡, 不同尺度涡旋之间的相互作用可以导致双涡合并, 其终态流型是一个较大尺度的类似于台风环流的涡旋。Luo and Liu (2006a)指出, 周秀骥等(2006)的结果在一个广阔参数空间内仍然成立。周嘉陵等(2006a, 2006b)进一步研究了多涡之间的相互作用。不同尺度涡旋之间强非线性过程中的跨尺度关联问题, 小尺度层次相互作用的结果可以影响到中尺度涡相互作用的过程, 再影响到天气尺度台风的自组织等研究也取得了初步结果(罗哲贤, 2005; Luo and Liu, 2006a, 2006b)。在文献(罗哲贤, 2005; 周嘉陵等, 2006a, 2006b; Luo and Liu, 2006a, 2006b)中, 引进模式的小尺度涡度场是人为给定的。罗哲贤和李春虎(2007)注意到这个不足, 分析了随机生成的小尺度涡度场对涡旋自组织的影响。台风与相邻中小尺度涡旋相互作用的动力学也取得若干进展(Luo and Liu, 2006a, 2006b, 2007)。

美国 Montgomery 教授是 2003 年国际涡旋动力学会议的召集人。21 世纪初, 他提出了国际上著名的台风增强的 Montgomery 模型(Montgomery and

Kallenbach, 1997; Enagonio and Montgomery, 2001)。该模型包含一个台风和几个中尺度涡。中尺度涡的能量被自组织进台风之中, 使台风增强。Luo and Liu(2008)提出了一个包含副热带高压、台风和几个中尺度涡的新模型。Montgomery 模型为新模型的特例。新模型的结果与 Montgomery 模型相比, 更加接近于观测实际。多年以来, 半径小于 50 km 的小涡一直被涡旋动力学领域国内外同行忽略不计。Ping et al. (2006)在理想模式的框架内发现: 这些小涡可以构成主涡的微环境场。不同的微环境场导致不同的涡旋自组织的结果, 引起主涡运动的复杂性。初始场上十多个大小不等的涡, 可以通过分段自组织的途径, 生成一个类似于台风的较大尺度的涡。初始涡的个数、尺度、分布和结构均可影响到自组织的成败(Ping and Luo, 2007)。

近年来发现, 对流性涡块的自组织是热带对流云团或中纬度中尺度对流复合体形成和发展的关键过程, 针对湿大气环境的动力分析方法, 将涡旋自组织动力学底部空间的新概念扩展到暴雨研究领域。指出在弱天气环境背景下, 半径小于 50 km 的中  $\gamma$  尺度涡旋的自组织和非线性发展可以造成局地突发性暴雨(Gao and Ping, 2004; Ping et al., 2008)。

本研究应用涡旋自组织的研究成果, 分析了近年来山东夏季暴雨过程的中尺度云团自组织, 以了解云团的自组织的一般规律为目的, 利用卫星云图资料进行 TBB 反演普查, 在此基础上对典型个例云团自组织过程进行分析, 得出统计规律, 并尝试在业务中应用。

## 1 资料和方法

所用资料包括 2000—2007 年的卫星云图数值资料、山东暴雨日 123 个测站降水量实况和原始报文资料, 并对 2008、2009 年涡旋自组织典型个例进行分析、试用。其中, 卫星云图数值资料的时间间隔基本为 1 h, 对应测站降水量时间间隔为 1 h。

暴雨日按以下标准选定: 将当日 20 时一次日 20 时降水量  $\geq 50$  mm 算一个暴雨日, 暴雨分为小范围暴雨(全省 1 个站以上、5 个站以下, 日降水量  $\geq 50$  mm)、区域暴雨(全省 5 个站以上、20 个站以下, 日降水量  $\geq 50$  mm)和大范围暴雨(全省 20 个站以上, 日降水量  $\geq 50$  mm)3 类。本文统计的暴雨日表示全省 5 个站及以上测站降水量达到暴雨。暴雨日确定后, 反查暴雨日前后所对应的云图资料。对 TBB 等值线进行反演, 量化分析中尺度云团的自组

织过程。

## 2 普查分析

在选取的暴雨日基础上,对卫星云图资料进行 TBB 反演,通过普查分析,筛选了 6 个典型的涡旋自组织个例,该 6 个个例表明在山东省区域性或大范围暴雨天气过程中,产生暴雨的云团的发展演变经历了由无组织到有组织、由不规则云形到规则云形的过程。

### 2.1 演变过程

下面对 2004 年 7 月 27 日暴雨天气过程演变过

程进行分析,其他 5 个个例的具体演变分析不在此展开。

2004 年 7 月 27 日 14:25(北京时,下同),在鲁东南有小云块 a 生成,位于鲁西地区的 2 个云块未参与自组织。3 h 后云块 a 东移至鲁中地区,同时在半岛有小云块 b、c 生成,云块 a、b 距离为 190 km, b、c 距离为 190 km(图 1a)。云块 a、b 不断向东北移动,22:25 云块 a、b、c 完成合并(图 1b)。23:25 在云块 C 西南方向沿黄河有条型云块 f 生成,同时在云块 C 西南尾部有云块 d 生成(图 1c)。28 日 00:25 C、d、f、g 四个云团中心清晰可见(图 1d)。

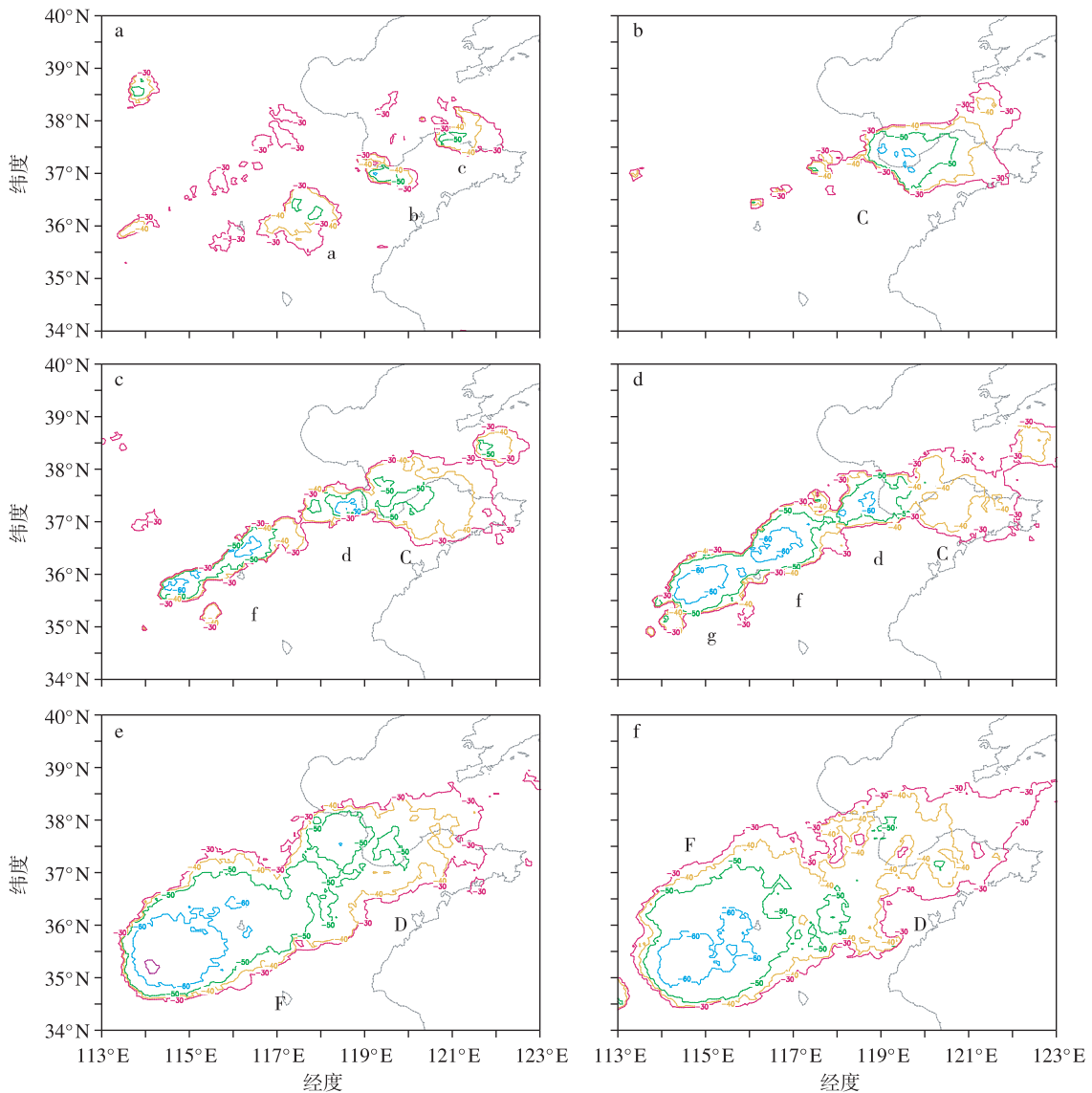


图 1 2004 年 7 月 27—28 日云团自组织过程的卫星云图 TBB 等值线反演结果(单位:℃) a. 27 日 17:25;b. 27 日 22:25;c. 27 日 23:25;d. 28 日 00:25;e. 28 日 02:25;f. 28 日 03:25

Fig. 1 The TBB isoline of satellite cloud in the self-organizing progress on July 27 and 28, 2004(units: °C) a. 17:25 BST 27 July;b. 22:25 BST 27 July;c. 23:25 BST 27 July;d. 00:25 BST 28 July;e. 02:25 BST 28 July;f. 03:25 BST 28 July

02:25 云块 C、d 和云块 f、g 分别合并(图 1e),03:25 完成自组织(图 1f),2 h 后迅速分解消亡。

由图 2 可见,较强降水从 27 日 20:00 开始,其中最强降水出现在 27 日 23:00—24:00,济南平阴 1 h 降水量最大,为 87.3 mm,较强降水一直持续到 28 日 07:00,维持 11 h。28 日 02:00 左右完成自组织过程,相应强降水落区出现在鲁西北、鲁北、鲁西南三个中心,28 日 01:00—02:00 滨州市降水量最大,为 72.3 mm,卫星云图上云顶亮温低值中心位于鲁西北。自组织完成后强降水维持 5 h。

## 2.2 统计特征

表 1 给出了 6 个个例云团自组织的特征量。简要分析如下(图略):

1)2000 年 7 月 18 日自组织过程,初始云块 a、b 相距 180 km,c、d 相距 140 km,d、e 相距 190 km,e、f 相距 310 km,b、f 相距 360 km;发生源地处于山东中西部、河南、安徽交界处及江苏境内;位于山西、河北、河南交界的小云块未参与自组织;最大 1 h 降水量出现在自组织后第 1 小时内;自组织完成后较强降水维持 5 h。

2)2000 年 7 月 27 日自组织过程,初始云块 a、b 距离较远;发生源地处于山西和京津地区;初始云块都参与自组织;最大 1 h 降水量出现在自组织后第 3 小时内;自组织完成后强降水维持 10 h。

3)2001 年 7 月 2 日自组织过程,初始云块 a、b 相距 110 km,b、c 相距 90 km,e、f 相距 110 km,d、f 相距 100 km;发生源地处于河北、山西交界;云块 c 未参与自组织;最大 1 h 降水量出现在自组织后第 2 小时内;自组织完成后较强降水持续 12 h。

4)2001 年 7 月 9 日自组织过程,初始云块 a、b 相距 160 km,b、c 相距 200 km,c、d 相距 110 km,d、

e 相距 160 km,e、f 相距 150 km;发生源地处于山东西部;山西西部有 1 云块未参与自组织;最大 1 h 降水量出现在自组织前第 5 小时内;自组织完成后强降水维持 8 h。

5)2004 年 7 月 27 日自组织过程,初始云块 a、b 相距 190 km,b、c 相距 190 km;发生源地处于山东南部;位于鲁西地区的 2 个云块未参与自组织;最大 1 h 降水量出现在自组织前第 3 小时内;自组织完成后强降水维持 5 h。

6)2007 年 7 月 18 日自组织过程,发生源地处于鲁西北;最大 1 h 降水量出现在自组织前第 4 小时内;完成自组织后强降水一直持续 10 h。

几个中尺度云团在合并前处于不同的发展阶段,在每个中尺度云团云顶最低温度的变化上有所体现,合并前有的已经处于减弱阶段,最低 TBB 呈现先降低后升高的变化态势,有的 TBB 一直在降低,表明对流旺盛,上冲云顶不断在抬高,仍处于发展阶段,合并后云团最低 TBB 一般比合并前的每个中尺度云团最低 TBB 都要低,这在以上个例分析中都有所体现,表明中尺度云团的合并不仅仅是形态上融合,而是内部结构更趋于组织化,激发出更强烈的上升气流,从而产生更显著的天气现象。同时发现即使合并之后,云团顶部也有多个中小尺度最低 TBB 中心,说明存在多个不同高度的上冲云顶。自组织完成后,如有新的云团并入,则它的维持时间较长,尺度也较大,在 2000 年 7 月 18 日和 2001 年 7 月 9 日自组织过程中反映明显,往往造成降水维持时间较长,强度较强。随着云团最强对流的逐渐减弱,云团面积迅速膨胀,并持续数小时后很快减小。云团自组织的发生与西风带弱的短波槽有联系,自组织后的云团附近存在弱斜压环境的作用主要是启动和制约位势不稳定的释放。

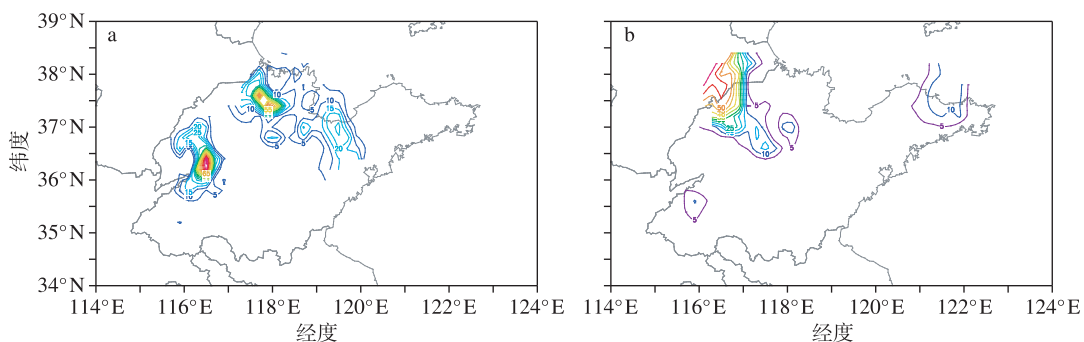


图 2 2004 年 7 月 28 日 01—02 时(a)、05—06 时(b)全省 1 h 降水量分布(单位:mm)

Fig. 2 The 1-hr rainfall(mm) distributions (a) from 01:00 to 02:00 BST, and (b) from 05:00 to 06:00 BST 28 July 2004

表 1 云团自组织的特征量

Table 1 Characteristic values of the cloud self-organizing

暴雨日期	初始			合并		终态			生命史/h
	时刻	云块数	最低 TBB/°C	时刻	最低 TBB/°C	时刻	最低 TBB/°C	涡面积/ (10 <sup>4</sup> km <sup>2</sup> )	
2000-07-18	05:00	6	-83.5	11:00	-76			38	6
2000-07-27	02:00	2	-70.5	16:00	-90			31	14
2001-07-02	02:00	6	-67	11:00	-83	15:00	-81.5	32	13
2001-07-09	05:00	6	-73	12:00	-81.5	16:00	-87.5	30	11
2004-07-27	09:25	3	-57.6	18:25	-57.1	19:25	-54.1	20	10
2007-07-18		若干		11:00				30	

注:表中空白处表示统计不确定.

### 2.3 预报模型

根据历史上 6 个较典型涡旋自组织个例,统计分析产生山东强降水过程的多云团自组织演变的特征量:初始云团数、尺度的演变以及自组织的时间尺度等。据此,可以得到云团自组织预报判据、指标和初步预报模型。

分析 1996—2004 年 6—8 月降水资料,暴雨日为 102 个,6、7、8 月暴雨日数比例为 1: 3: 3。对 1996—2004 年逐年暴雨日及距平逐年变化时间序列分析,7、8 月的暴雨日振荡周期与整个夏季相近,特别是 7 月的变化趋势与夏季最为接近,所以 7 月暴雨年际变化对山东夏季暴雨的年际变化起主要作用。

统计(表 2)发现,造成山东暴雨的云团自组织过程多发生在 7 月,这与山东暴雨多发阶段及夏季年际变化主要影响期相一致;平均影响日期为 7 月 17 日;起始时刻平均为 13 时左右,初始云块平均为 5 个左右,云团之间平均距离为 200 km 左右,约有 1 个云块未进行自组织过程,源地多发生在山东、河南、河北三省交界及鲁西地区,与地形、地方性热源有关。初始时生成云团 TBB 最低值平均为 -70 °C,自组织时云团 TBB 最低值平均为 -77.5 °C,终

态消亡时 TBB 最低值平均为 -74 °C。1 h 最强降水一般出现在自组织完成时刻或其前后 3 h 左右,自组织完成后较强降水平均持续时间为 8 h 左右。云团从初始生成到自组织并直至消亡整个过程(生命史)11 h 左右,其中从生成到自组织 9 h 左右,完成自组织到消亡维持时间 3 h 左右。终态涡面积大约 30 × 10<sup>4</sup> km<sup>2</sup>。

### 3 应用分析

利用涡旋自组织理论和前面普查分析得到的云团自组织预报判据、指标及初步预报模型,对 2008 年 7 月 17 日和 2009 年 7 月 8 日两次典型暴雨个例进行试用。

#### 3.1 2008 年 7 月 17 日暴雨个例

2008 年 7 月 17 日 23:30,在山东、河北、河南三省交界有云块 a 生成;在鲁西南有云块 b 生成;鲁西一带有小云块 d,沿黄河向东北移动入渤海,未进行合并(图 3a)。云块 a、b 相距 230 km,a、d 相距 200 km,b、c 相距 220 km。18 日 00 时中尺度云块 b 发展,水平尺度为 200 km 左右;同时在山东以南安徽、江苏交界有云块 c。云块 a、b 自西南向东北移动,云块 c 向西北方向移动,18 日 01:30,云块 a 合并入

表 2 云团自组织模型的特征量

Table 2 Characteristic values of the cloud self-organizing model

影响时间			源地	初始云块		TBB 最低值/°C			降水		生命史/h			终态涡面积/ (10 <sup>4</sup> km <sup>2</sup> )
多发时期	平均日期	起始时刻		平均数量/个	平均距离/km	初始时	自组织时	消亡时	1 h 最强时刻	自组织后强降水持续时间/h	全部	自组织前	自组织后	
7 月	7 月 17 日	13 时	山东、河南、河北交界及鲁西	5(1 个未参与)	200	-70	-77.5	-74	自组织时或前后 3 h	8	11	9	3	30

b 中,面积增大,强度增强,位于鲁西南(图 3b)。2 h 后,云块 c 北移过程中在鲁南合并到 b,完成自组织过程,形成云团 B,尺度约为 600 km。对流云团向东移动影响山东,其北部移速快,南部移动缓慢,强度增强。至 18 日 06:30 发展最旺盛(图 3c),以后逐渐减弱,北部开始分裂,4 h 后分裂为中尺度云块 e、f,至 18 日 14:30 消亡(图 3d)。

该次自组织过程,初始时云团 TBB 最低值平均为  $-70^{\circ}\text{C}$ ,自组织时云团 TBB 最低值平均为  $-77.5^{\circ}\text{C}$ ,终态消亡时 TBB 最低值平均为  $-74^{\circ}\text{C}$ 。1 h 最强降水一般出现在自组织完成时刻或其前后 3 h 左右,自组织完成后较强降水平均持续时间为 8 h 左右。云团从初始生成到自组织并直至消亡整个过程(生命史)为 11 h 左右,其中从生成到自组织为 9 h 左右,完成自组织到消亡维持时间为 3 h 左右。终态涡面积约为  $30 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。

本次个例发生在对流旺盛的 7 月 17、18 日,初始云块为 4 个,源地位于山东、河南、河北交界及鲁西南;天气形势上,副高南侧有热带台风存在,17 日 08 时 500 hPa 河套地区上游有西风槽东移;从 17 日

20 时垂直速度场分析,垂直运动高度很高,并且略有倾斜,表明有冷空气侵入,斜压发展。同时,初始云块 a、b、c 之间平均距离为 220 km,预计有 1 个云块未进行自组织过程,云团 TBB 最低值在小于  $-60^{\circ}\text{C}$  的范围内,面积大小符合多单体发展演变统计范围。因此,根据涡旋自组织动力学研究成果,从小尺度系统的角度出发,结合前面较典型的云团自组织个例,作为短时预报的判据和指标。预报短时(0~12 h)云块 a、b、c 多单体在东移过程中很可能完成自组织,生成中尺度对流云团,造成山东中东部地区的暴雨,预计云团从生成到自组织为 9 h 左右;自组织完成后维持时间 3 h 左右;终态涡面积大约  $30 \times 10^4 \text{ km}^2$ ;1 h 最强降水可能出现在自组织完成时刻或其前后 3 h 左右;自组织完成后较强降水持续时间为 8 h 左右。

最强降水出现在 17 日 23:00—24:00,鲁西南菏泽曹县降水最大,为 75.1 mm;自组织时刻 18 日 03:00—04:00 的降水量强度大、范围广,菏泽巨野最大,为 50.0 mm;完成自组织后强降水一直持续了 10 h(图 4)。

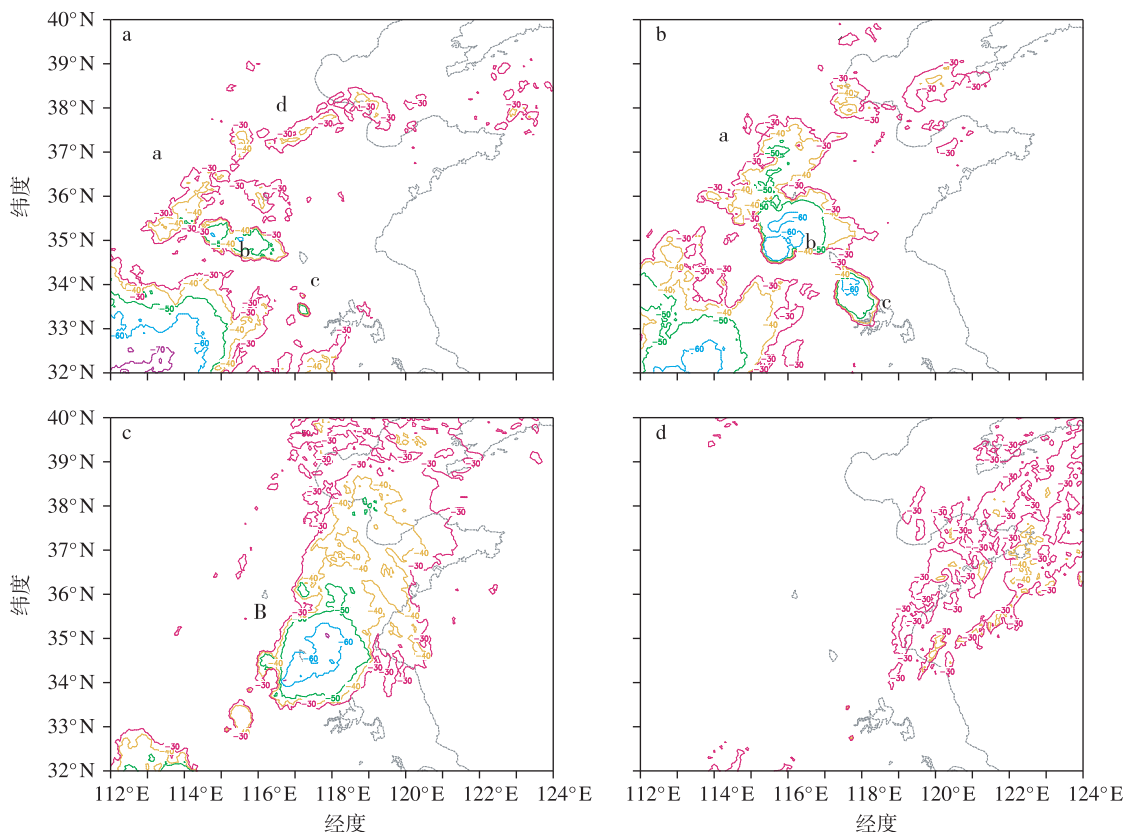


图 3 2008 年 7 月 17、18 日卫星云图的 TBB 等值线反演结果(单位:  $^{\circ}\text{C}$ ) a. 17 日 23:30; b. 18 日 01:30; c. 18 日 06:30; d. 18 日 14:30

Fig. 3 The TBB isoline of satellite cloud on July 17 and 18, 2008(units:  $^{\circ}\text{C}$ ) a. 23:30 BST 17 July; b. 01:30 BST 18 July; c. 06:30 BST 18 July; d. 14:30 BST 18 July



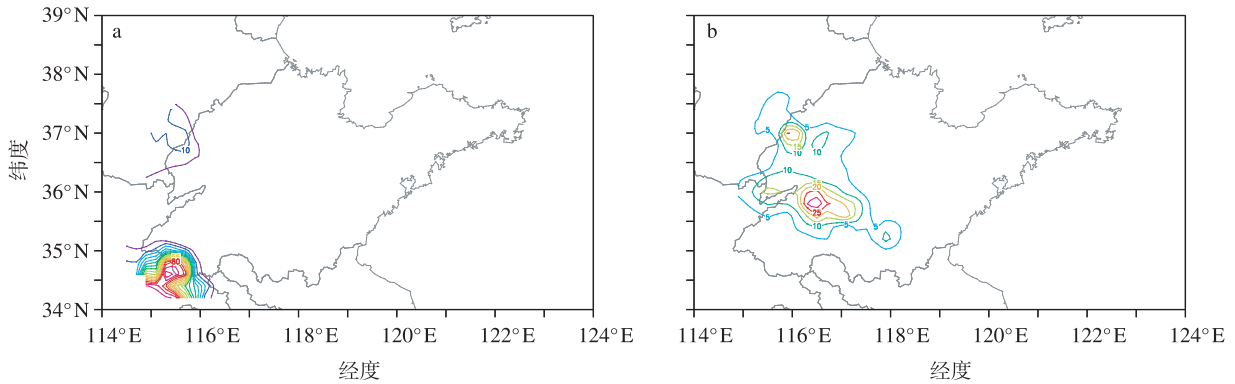


图 4 2008 年 7 月 17 日 23—24 时(a)、18 日 03—04 时(b)全省 1 h 降水量分布(单位:mm)

Fig. 4 The 1-hr rainfall(mm) distributions (a)from 23:00 to 24:00 17 July, and (b)from 03:00 to 04:00 18 July 2008

经检验,这次过程天气形势符合统计规律,特别是西风槽的存在。同时,初始云块生成源地及个数、距离、TBB 最低值、面积和维持时间(生命史统计 11 h)、终态涡面积也与统计规律吻合。

### 3.2 2009 年 7 月 8 日暴雨个例

2009 年 7 月 8 日 08:30,在鲁西南与安徽北部交界有云块 A 生成,稳定少动并不断增强;在河北南部、山西以西有云块 B 生成;河北中北部有对流

云团 C(图 5a)。云团 B、C 缓慢移动,主体向东移动,并向南分裂在山东、河南、河北交界生成涡旋状小对流云块。云块 A、B 相距 210 km,B、C 相距 150 km,A、C 相距 330 km。8 日 11:30,云团 B、C 在向南分裂的过程中生成小尺度云块 b 和中尺度对流云块 c;云团 A 为副热带高压边缘的切变线云系,由于水汽和能量条件增强,发展增强至中尺度云团,水平尺度为 100 km 左右,面积约为 800 km<sup>2</sup>。

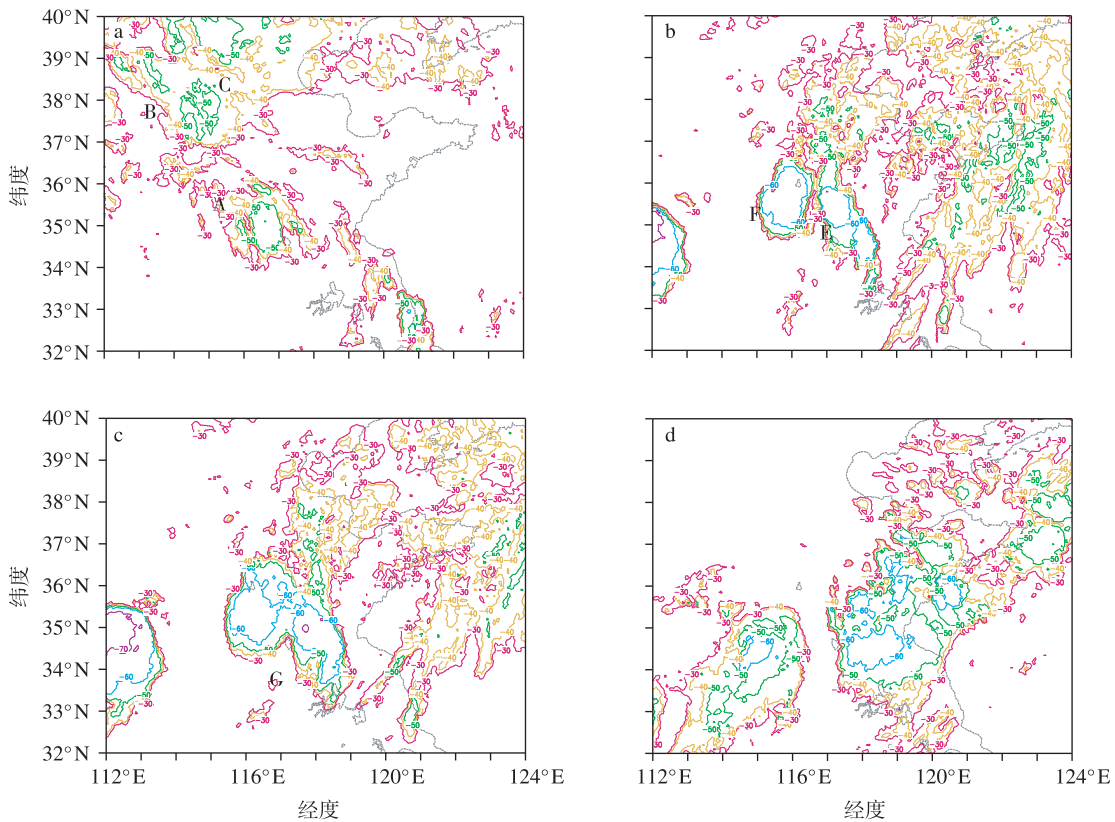


图 5 2009 年 7 月 8 日卫星云图的 TBB 等值线反演结果(单位:℃) a. 08:30;b. 16:30;c. 17:30;d. 22:30

Fig. 5 The TBB isoline of satellite cloud on July 8,2009(units:℃) a. 08:30 BST;b. 16:30 BST;c. 17:30 BST;d. 22:30 BST

8 日 15:00, 鲁南暖切变北抬与西部的低涡切变线合并后东移, 云团 A 东侧沿切变线方向分裂生成新的云块 D; 云块 b、c 分别位于鲁西南、鲁西沿黄河一带西侧, 向东南移动并增强。16:30, 云块 c 在向东南移动的过程中与云块 b、D 分别合并生成云块 F、E(图 5b)。17:30, 云块 F 在向东北移动的过程中与云块 E 合并, 完成自组织过程, 在鲁南生成中尺度对流系统(MCS) G, 尺度约为 210 km, 为  $\alpha$  中尺度暴雨云团(图 5c)。此后, 对流云团 G 向东北方向移动, 影响鲁中、鲁东南和半岛地区, 至 22:30 发展最旺盛(图 5d), 23 时开始减弱、分裂, 5 h 后移出山东省, 结束影响。

本次自组织过程, 发生在对流旺盛的 7 月 8 日, 初始云块为 3 个, 源地位于河北、鲁西南及山东、河北交界。8 日 08 时 500 hPa 河套地区有高空槽东移, 槽后有弱的冷平流, 槽后弱冷空气和副高边缘西南暖湿气流在山东交汇, 低涡切变线是这次暴雨过程的主要影响系统, 有冷空气从低涡后部侵入, 使低涡斜压性加强, 东移发展。同时, 初始云块 A、B、C 之间平均距离为 230 km, 预计有 1 个云块未进行自组织过程, 云团 TBB 最低值为  $-70^{\circ}\text{C}$  左右, 面积大小符合多单体发展演变统计范围。因此, 根据涡旋自组织动力学研究成果, 从中小尺度系统的角度出发, 结合前面较典型的云团自组织个例, 作为短时预报的判据和指标。预报短时(0~12 h)云块 A、B、C 多单体移动过程中很可能完成自组织, 生成中尺度对流系统(MCS), 造成山东省鲁中、鲁东南和半岛地区的暴雨, 预计云团从生成到自组织 9 h 左右; 自组织完成后维持时间 3 h 左右; 1 h 最强降水可能出现在自组织完成时刻或其前后 3 h 左右; 自组织完成后较强降水持续时间为 8 h 左右。

最强降水出现在 8 日 20:00—21:00, 鲁西南济

宁曲阜最大, 为 48.4 mm; 自组织时刻 8 日 17:00—18:00 降水量强度大、范围广, 聊城最大, 为 33.1 mm; 完成自组织后强降水一直持续 12 h(图 6)。

经检验, 这次过程天气形势符合统计规律, 特别是西风槽的存在。初始云块生成源地及个数(3 个, 统计为 5 个)、距离、TBB 最低值和生命史(13 h, 统计为 11 h)也与统计规律吻合。云团从初始时刻到完成自组织时间为 9 h 与统计规律完全吻合, 1 h 最强降水出现在自组织完成后 3 h 左右。

将涡旋自组织动力学研究成果应用到山东省灾害性天气短时临近预报中, 有利于进一步开拓思路、加强短时临近预报和精细化预报方法研究, 提高灾害性天气短时临近预报准确率和有效预警区域、时效, 为业务工作提供了强有力的科技支撑。

#### 4 结论和讨论

造成山东暴雨的云团自组织过程多发生在 7 月; 平均影响日期为 7 月 17 日; 起始时刻平均为 13 时左右, 初始云块平均为 5 个左右, 云团之间平均距离为 200 km 左右, 约有 1 个云块未进行自组织过程, 源地多发生在山东、河南、河北三省交界及鲁西地区。初始时生成云团 TBB 最低值平均为  $-70^{\circ}\text{C}$ , 自组织时云团 TBB 最低值平均为  $-77.5^{\circ}\text{C}$ , 终态消亡时 TBB 最低值平均为  $-74^{\circ}\text{C}$ 。1 h 最强降水一般出现在自组织完成时刻或其前后 3 h 左右, 自组织完成后较强降水平均持续时间为 8 h 左右。云团从初始生成到自组织并直至消亡整个过程 11 h 左右, 其中从生成到自组织 9 h 左右, 完成自组织到消亡维持时间 3 h 左右。终态涡面积大约  $30 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。

本文将涡旋自组织应用于山东夏季暴雨预报, 利用气象卫星资料对典型过程进行统计分析并试

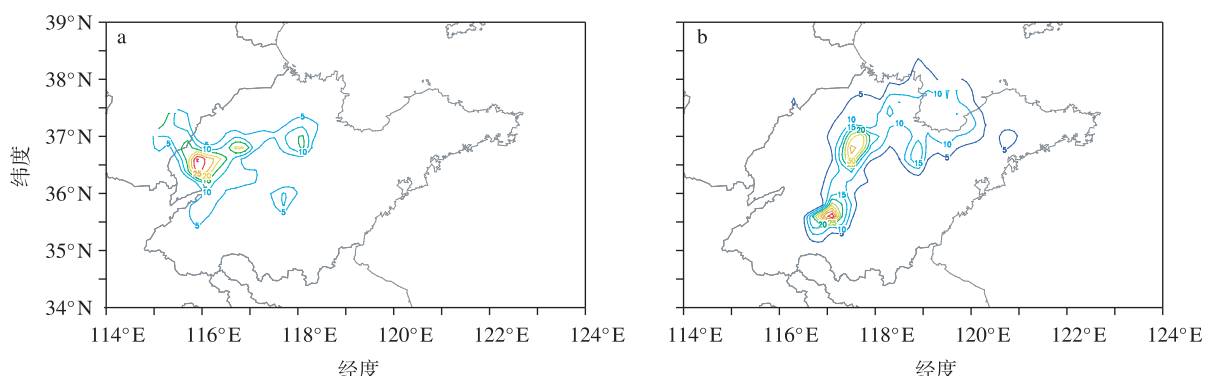


图 6 2009 年 7 月 8 日 17—18 时(a)、20—21 时(b)山东省 1 h 降水量分布(单位:mm)

Fig. 6 The 1-hr rainfall(mm) distributions (a) from 17:00 to 18:00 BST, and (b) from 20:00 to 21:00 BST 8 July 2009



用。目前仅仅从云团自组织的业务应用方面进行了初步研究探讨。一方面在研究应用中,认识到强降水也不一定产生在两个涡的合并之后,也发现在两个涡旋相互接近的过程中就已经产生强降水了,也有少部分是在两个涡合并后,涡旋的中心部位有强降水,因此,降水的具体量级和落区是个难点;据个例分析,一次中尺度云团的自组织的时间尺度约10h左右,这对中尺度系统来讲,背景场即环境场很重要,也即天气尺度背景很重要,环境场地域、稳定性、强度、移动性等要特别关注。另一方面,从进一步研究的角度考虑,需要同时研究云团合并与涡旋合并以及两者之间的配合和关系,通过分析自组织过程中的云团以及与之相对应的涡旋的尺度、强度、距离、面积和形态等之间的异同和关系,或能更好地应用于天气预报实践。

## 参考文献:

- 曹钢锋,张善君,朱官忠,等. 1988. 山东天气分析与预报[M]. 北京:气象出版社:156-180.
- 陈联寿,丁一汇. 1979. 西太平洋台风概论[M]. 北京:科学出版社:128-139.
- 蒋伯仁,孙兴池,张少林. 2005. 山东主汛期暴雨分析及预报研究综述[J]. 山东气象,25(2):1-4.
- 李昌义. 2000. 客观暴雨预报在暴雨落点预报中的应用[C]//暴雨落区预报实用方法. 北京:气象出版社:38-43.
- 李昌义,顾润源,张飒,等. 1999. 暴雨站数预报在暴雨落点预报中的应用[J]. 气象,25(8):25-29.
- 李昌义,顾润源,孙兴池,等. 2000a. 非线性因子预报山东暴雨站数的研究[C]//暴雨落区预报实用方法. 北京:气象出版社:48-52.
- 李昌义,顾润源,张飒,等. 2000b. 物理量综合指数预报山东暴雨落点方法研究[C]//暴雨落区预报实用方法. 北京:气象出版社:1-4.
- 李昌义,顾润源,张飒,等. 2000c. 山东区域性暴雨和局地性暴雨物理量场特征分析[C]//暴雨落区预报实用方法. 北京:气象出版社:108-114.
- 刘文,赵玉金,张善君,等. 2003. GMS 卫星遥感资料监测暴雨技术[J]. 气象,29(3):49-53.
- 罗德海. 1997. 阻塞高压动力学[M]. 北京:科学出版社:281.
- 罗哲贤. 1989. 阻塞高压形成机制的数值研究[J]. 中国科学 B 辑,19(6):665-672.
- 罗哲贤. 2005. 多尺度系统中台风自组织的研究[J]. 气象学报,63(5):672-682.
- 罗哲贤,李春虎. 2007. 随机分布的小尺度涡对涡旋自组织影响的研究[J]. 气象学报,65(6):856-863.
- 闫丽凤,蔡则鹏,王建国,等. 1999. 场相似在汛期暴雨预报中的应用[J]. 气象,25(2):33-39.
- 张经珍,郝家学,侯淑梅,等. 1998. 黄河三角洲短期暴雨预报系统[J]. 气象,24(9):46-50.
- 周嘉陵,马镜娴,陈联寿,等. 2006a. 多涡自组织的初步研究[J]. 气象学报,64(4):464-473.
- 周嘉陵,马镜娴,陈联寿,等. 2006b. 初始涡的结构与尺度对涡旋自组织影响的研究[J]. 气象学报,64(5):537-551.
- 周秀骥,罗哲贤,高守亭. 2006. 涡旋自组织的两类可能机制[J]. 中国科学 D 辑,36(2):201-208.
- Enagonio J, Montgomery M T. 2001. Tropical cyclogenesis via convectively forced vortex Rossby waves in a shallow-water primitive equation model[J]. J Atmos Sci,58:685-705.
- Gao S, Ping F. 2004. A convective vorticity vector associated with tropical convection: A two-dimensional cloud-resolving modeling study[J]. J Geophys Res, 109, D14106, doi:10. 1029/2004JD004807.
- Luo Z, Liu C. 2006a. An investigation into the sensitivity of idealized vortex interactions to initial conditions and island topography[J]. Geophys Res Lett,33, L01809, doi:10. 1029/2005GL024543.
- Luo Z, Liu C. 2006b. Diversity of microenvironments and the complexity of vortex motion[J]. Geophys Res Lett, 33, L24805, doi:10. 1029/2006GL027765.
- Luo Z, Liu C. 2007. An investigation into axisymmetrization of a vortex embedded in horizontal shearing currents[J]. J Geophys Res, 112, D06103, doi:10. 1029/2006JD 007087.
- Luo Z, Liu C. 2008. A numerical study of multiple vortex self-organization as forced by mesoscale topography[J]. Meteorology and Atmospheric Physics, 99, doi:10. 1007/s00703-007-0269-0.
- Montgomery M T, Kallenbach R J. 1997. A theory for vortex Rossby-waves and its application to spiral bands and intensity changes in hurricanes[J]. Quart J Roy Meteor Soc,123:435-465.
- Ping Fan, Luo Zhexian. 2007. Numerical simulation of Meiyu front and the diagnosis of moist vorticity[J]. Progress in Natural Science, 17(11):1341-1347.
- Ping Fan, Luo Zhexian, Ju Jianhua. 2006. The numerical studies of vortices and precipitating clouds merging in the middle latitude continent[J]. Chinese Physics Letters, 15(5):784-787.
- Ping Fan, Luo Zhexian, Li Xiaofan. 2008. Kinematics, cloud microphysics and spatial structures of tropical cloud clusters: A two-dimensional cloud resolving modeling study[J]. Atmospheric Research, 88(3/4):323-336.

(责任编辑:倪东鸿)