

朱士超,袁野,吴林林,等,2017. 江淮对流云发生规律及其垂直结构分析[J]. 气象,43(6):696-704.

江淮对流云发生规律及其 垂直结构分析*

朱士超¹ 袁 野¹ 吴林林¹ 姚叶青² 吴 月³

¹ 安徽省人工影响天气办公室,合肥 230031

² 安徽省气象台,合肥 230031

³ 合肥市气象局,合肥 230041

提 要: 利用安徽省内多普勒雷达组网数据,统计分析了江淮地区 2013—2014 年 6—9 月发生的对流云结构特征,共找出 227 个对流云个例,将不同对流云按结构分为 9 类,归类后发现江淮对流云以孤立对流、簇状对流和非线性对流为主,分别占总对流数的 29.1%、18.1%和 23.3%。不同的天气背景条件下,主要发生的对流结构也不同,低槽 I 型天气下,主要以孤立对流云为主;低槽 II 型天气下,主要发生的对流以非线状对流为主,同时由于低槽 II 型是江淮地区多发的天气类型,所以这种天气是各种对流的高发天气。利用调频连续波雷达探测获得高时空分辨率云体时间-高度剖面,了解云体的垂直结构,给出比一般雷达产品更加精细的对流云个例显示,典型孤立对流云、簇状对流云和非线状对流云的个例剖面图,及相应水粒子最大下落速度分别为 13.3、8.2 和 11.5 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

关键词: 对流云,结构分类,天气背景,垂直结构

中图分类号: P401

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2017.06.006

Analysis on Characteristics and Vertical Structure of Convective Clouds over the Area Between Yangtze River and Huaihe River

ZHU Shichao¹ YUAN Ye¹ WU Linlin¹ YAO Yeqing² WU Yue³

¹ Anhui Weather Modification Office, Hefei 230031

² Anhui Meteorological Observatory, Hefei 230031

³ Hefei Meteorological Bureau, Hefei 230041

Abstract: This paper analyzed structure characteristics of convective clouds over the area between the Yangtze River and the Huaihe River based on Doppler radar data during 2013—2014. The used 227 convective cloud cases are classified into nine structure types. Then, we found that the isolated cell (IC), clusters of cells (CC), nonlinear systems (NL) are the dominant convective clouds over this area, accounting for 29.1%, 18.1%, and 23.3% of the total respectively. Different structural convective clouds occur under different weather backgrounds. Isolated cell is the main convection in the trough I pattern; nonlinear system is the major convection in the trough II pattern. At the same time, other structural convective clouds also occur frequently due to the common synoptic conditions. The convective clouds detected by the C-FMCW radar show higher resolution of IC, CC and NL cloud structure images and the maximum falling speeds of precipitation particles, reaching 13.3 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$, 8.2 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ and 11.5 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$, respectively.

* 安徽省硕博启动项目(RC201514)、公益性行业(气象)科研专项(GYHY201306040)、安徽省气象局科技发展基金(KM201601)和中国气象局气溶胶与云降水重点开放实验室开放课题(KDW1402)共同资助

2016 年 1 月 21 日收稿; 2016 年 9 月 20 日收修定稿

第一作者:朱士超,主要从事云降水物理研究. Email: zsc-6387099@163.com

Key words: convective clouds, structure classification, weather background, vertical structure

引 言

江淮对流云是江淮地区的重要降水云系(Luo et al, 2008; 袁野等, 2008; 贾烁和姚展予, 2016), 在不同的天气形势下经常产生不同结构的对流云, 同时对流云的结构还受地形(Fuhrer and Schär, 2005)、发生时间等要素影响(Fu and Guo, 2011), 对江淮地区对流云结构进行分类, 并归纳不同对流云产生的天气背景具有重要意义(蒋年冲等, 2007)。

早期主要是利用雷达数据和卫星数据对中尺度对流系统进行分类(Bluestein and Jain, 1985; Jirak et al, 2003; Parker and Johnson, 2000)。Bluestein and Jain(1985)利用卫星和雷达数据把俄克拉荷马州的中尺度对流分为了四类, 分别是: 线状破碎对流、区域破碎对流、更替式对流和嵌入式对流。Parker and Johnson(2000)对美国中部地区的线状对流结构进行分类, 按照层状云在对流云的不同位置把线状对流分为 3 类, 分别是层云尾随对流云系统、层云引导对流云系统和层云平行对流云系统。Gallus et al(2008)对美国北部 10 个州(4—8 月)的雷达数据进行统计, 把对流分成 9 类, 分别是 3 种泡状对流、5 种线状对流和 1 种非线状对流, 同时把不同对流产生的灾害天气进行归类。Lombardo and Colle(2010)利用雷达数据把美国西北部的暖季(5—8 月)对流也分成 9 类, 同样是 3 种泡状对流、5 种线状对流和 1 种非线状对流, 同时分析了不同对流云产生的天气背景。国内王晓芳和崔春光(2012)分析了长江中下游地区梅雨期中尺度对流系统的类型和活动特征, 并对其进行了分类。郑淋淋和孙建华(2012)对中国江淮和黄淮流域中尺度对流云系的结构类型做了分类, 把对流云按照结构特征分为 8 类。许焕斌(2015)详细解释了不同对流结构系统的生成演变机理, 同时提到对流系统分类不仅要按照结构分类, 还应考虑不同物理机制, 这样才能更好地理解不同结构对流的发生发展。

另外, 云的垂直结构特征, 无论是对天气、气候还是人工影响天气都十分重要, 是非常重要的云宏观特征(Slingo and Slingo, 1988; Wang and Rossow, 1998), 云的垂直结构反映了云体内部热力和动

力过程, 通过辐射和潜热加热影响大气环流, 但又难以确定其影响程度(Randall et al, 1989), 同时云的垂直分布直接影响云中的微物理过程, 从而影响降水的发生和强度(Jakob and Klein, 1999), 对于云结构的精确描述目前仍然是数值模式中的难点, 云垂直分布的不确定性是研究云对气候影响的最大障碍之一(Barker et al, 1999)。

江淮地区天气背景复杂, 在江淮地区产生的对流结构也丰富多样, 对该地区对流云结构进行分类, 分析不同天气背景下产生的对流云结构特征, 研究不同结构对流云垂直结构分布特征, 对于对流云预报及人工影响天气作业都具有重要意义。

1 观测资料及分析方法

本文主要利用安徽省内多普勒雷达组网数据, 选择区域为安徽省内长江以北区域, 重点统计江淮之间区域。本文对对流云的判定方法参考了 Lombardo and Colle(2010)对美国西北部的暖季对流云判定方法, 把雷达回波强度 ≥ 35 dBz 的云系判定为对流云, 该方法能够较好地降低对流云的错判(Gallus et al, 2008)。统计了 2013 和 2014 年 6—9 月在江淮地区产生的不同结构类型的对流云, 共找出 227 个对流云个例, 并对这些对流云个例按照不同结构进行了归类。

同时在 2013 年, 放置一部调频连续波雷达在江淮地区观测, 观测到多个不同结构的对流云个例, 该雷达具有较高的时空分辨率, 所以可以利用该数据分析不同类型对流云的垂直结构, 表 1 给出了调频连续波雷达主要技术参数(刘黎平等, 2015)。

表 1 调频连续波雷达主要技术参数
Table 1 The major technical parameters of the C-FMCW radar

参数	指标
工作频率	5530 MHz $\pm$ 3 MHz/ $\pm$ 3.5 MHz
探测方式	固定垂直指向探测
探测距离	0.015~24 km
重复周期	600 s/700 s
时间分辨率	3 s
距离库长、库数	库长: 15 m/30 m, 库数: 800/500
探测能力	15 km 高度处探测能力低于-20 dBz
天线型式	收发分置, 抛物面

2 对流云结构分类特征

2.1 对流云结构分类

通过江淮地区雷达组网数据统计的对流云个

例,在结构上具有较大差异,为了区分不同的对流云结构,需要对对流云个例进行分类,本文对对流云结构的分类参考了 Lombardo and Colle(2010)对美国西北部的暖季对流分类方法,将 227 个江淮对流云个例分为 9 类,表 2 是对流云结构分类及简称。

表 2 对流云结构分类及简称
Table 2 Structure classification and abbreviation of convective clouds

对流云名称	英文名称	简称	备注
孤立对流云	isolated cell	IC	孤立的单一对流
簇状对流云	clusters of cells	CC	对流云成簇状排列
非线性状对流	nonlinear systems	NL	对流云和层云在一起,但成非线性状排列
破碎线状对流	broken lines	BL	线状对流发展后期,线状破坏后形成
线状对流	linear systems with no stratiformrain	NS	对流成线状排列,无层云伴随
线状引导层云系统	linear systems with trailing stratiform rain	TS	对流成线状排列,移动方向后有层云尾随
线状平行层云系统	linear systems with parallel stratiform rain	PS	对流成线状排列,垂直移动方向有层云平行伴随
层云引导线状系统	linear systems with leading stratiform rain	LS	对流成线状排列,移动方向前有层云伴随
弓状回波系统	bow echoes	BE	对流成弓状排列

图 1 是江淮地区几种主要对流云示例,从图中可以看出,IC 对流云发生时最大回波强度比较强,但是随着远离强回波中心,回波减弱比较快,周边通常没有其他云系存在。CC 对流云的特征为多个对流成簇状同时发生发展,对流回波强度有强有弱,周边没有太多层云伴随。NL 对流云的特征为对流云呈非线性状排列,同时周围常伴随层云,对流云一般镶嵌在层云中。NS 对流云的特征为对流云呈线状排列,但是周边没有层云伴随。TS 对流云的特征为对流云呈线状排列,同时移动方向后有层云尾随,层云大部分是由对流云过境后生成,所以此云系通常可由 NS 发展形成。PS 对流云的特征为对流云呈线状排列,同时旁边有层云平行伴随,两者同时移动。

2.2 分布特征

通过统计分析江淮地区对流云结构发现,不同结构的对流云发生的概率具有差异,表 3 统计了 2013—2014 年 6—9 月不同结构对流云在江淮地区的发生次数,其中孤立对流发生次数最多,共发生 66 次,最少是弓状回波对流,发生 1 次。图 2 是不同结构对流云所占百分比,统计结果显示,江淮地区对流云以孤立对流云、簇状对流云和非线性对流云为主,这三种对流云分别占了总对流云的 29.1%、18.1 和 23.3%。Gallus et al(2008)对美国北部的雷达数据进行统计,发现当地对流系统以非线性状对

流云为主,占有所有对流云的 29%,而簇状对流云和孤立对流云比例分别为 20%和 26%。而 Lombardo and Colle(2010)分析美国西北部的暖季对流时发现,孤立对流云、簇状对流云和非线性对流云占的比例分别为 14%、28%和 33%。对比以上统计结果可以发现,由于地域的差异,不同结构对流云所占的比例不同,同时占主导地位的对流结构也具有差异。

在时间分布上,对流云发生的频率也具有较大差异,图 3 是不同时间对流云发生的频率统计,图 3a 是不同月份对流云的发生次数,从图中可以看出,对于 2013—2014 年 6—9 月江淮对流云统计后发现,8 月是对流云高发期,对流发生次数是 6 月的两倍多,图 3b 是不同月份孤立对流云的发生次数,孤立对流云发生的次数也满足此规律,8 月孤立对流云发生最多,6 和 9 月发生孤立对流云次数相对较少。Gallus et al(2008)对美国北部的雷达数据进行统计发现,7 月是当地对流云高发期,孤立对流云高发期也是 7 月,而 Lombardo and Colle(2010)分析美国西北部的暖季对流时发现,8 月是当地对流云高发期,但是孤立对流云的高发期是 6 月,说明不同地区对流云的高发期存在差异。

图 3c 是江淮对流云在一日内发生频次统计,从图中可以看出,江淮地区对流云多发生在午后 12—18 时,其中 16 时发生对流的频率最高,同时 08—09 时存在对流发生的次峰值,00—07 时发生对流发生次数较少。而 Lombardo and Colle(2010)分析美国

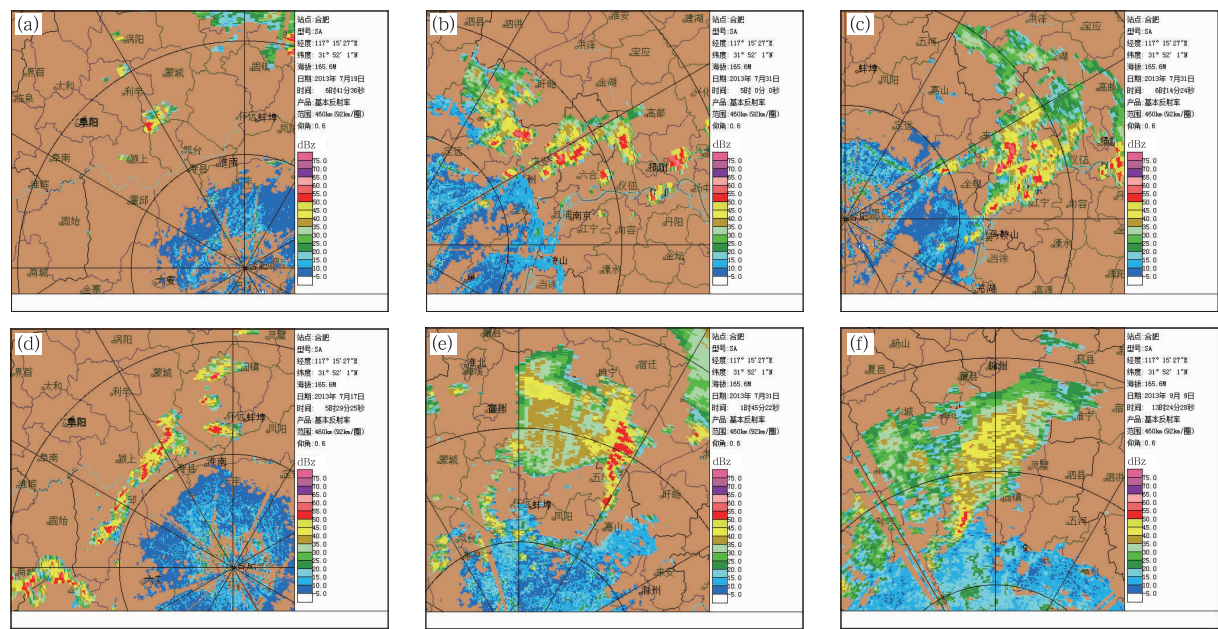


图 1 江淮地区几种主要对流云

(a)IC, (b)CC, (c)NL, (d)NS, (e)TS, (f)PS

Fig. 1 Several main structural convective clouds in the study area

(a) IC, (b) CC, (c) NL, (d) NS, (e) TS, (f) PS

表 3 不同结构对流云发生次数

Table 3 The number of different structure convection

对流名称	发生次数
IC	66
CC	41
NL	53
BL	4
NS	24
TS	27
LS	3
PS	8
BE	1

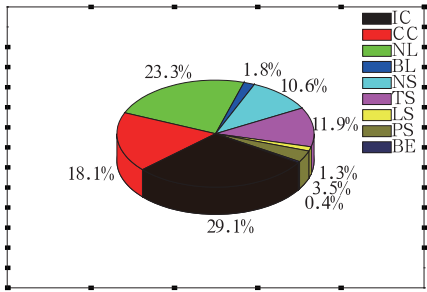


图 2 不同对流云所占百分比

Fig. 2 Percentage of different convective clouds

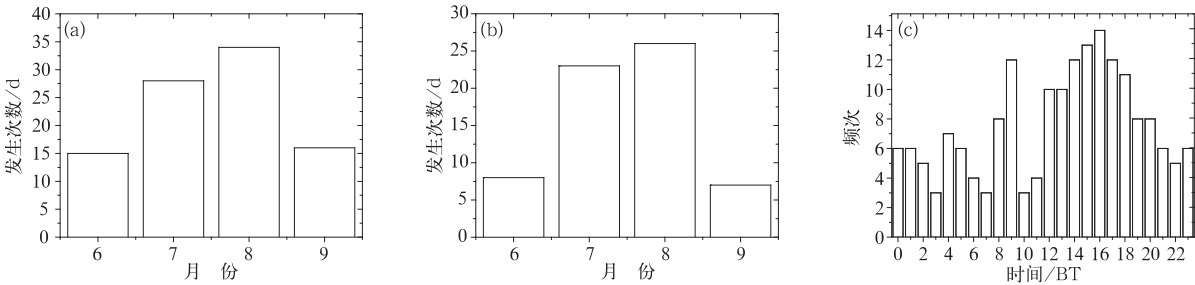


图 3 对流发生时间分布图

(a)不同月份对流云的发生次数,(b)不同月份孤立对流云的发生次数,(c)一日内不同时间发生对流频次统计

Fig. 3 Temporal distribution of convection

(a) frequency of convective clouds seen in different months, (b) frequency of IC seen in different months, (c) frequency of convection with times of a day

西北部的暖季对流时发现,在该地区对流发生的主要时段集中在 18—00 时,06—12 时对流云发生次数较少。

2.3 天气类型分类

江淮地区天气背景复杂,覃丹宇等(2014)利用经验正交函数分解方法,分析了静止卫星的云顶亮温资料,把江淮地区夏季的天气背景分为多个模式,参考该文献天气形势分类方法,表 4 给出了江淮对流云出现时的各种天气环流特征,通过表 4 可以看出,不同的天气背景下,江淮地区均有发生对流的可

能性。

不同的天气背景下,产生的对流结构也具有差异,表 5 是各种结构对流云在不同天气类型下发生的次数,从表中可以看出,不同的天气类型,主要发生的对流结构也不同,低槽 I 型天气下,主要以孤立对流云为主;低槽 II 型天气下,主要发生的对流以非线状对流云为主,同时由于低槽 II 型是江淮地区多发的天气类型,所以这种天气是各种对流的高发天气。平直西风型天气,内陆高压外围型天气和高压脊型天气在江淮地区出现较少,所以在这几类天气类型下,对流发生的频次也相对较少。

表 4 天气环流形式特征

Table 4 Characteristics of different weather backgrounds

天气环流型	环流特征
低槽 I 型	低槽的主体位于我国华北地区,槽线未超过 120°E
低槽 II 型	副热带高压(以下简称副高)向西发展到了 130°E 以西的区域,安徽省处于来自于北方的低槽前部
副高控制型	安徽省有部分或者全部区域的位势高度高于或等于 5880 gpm
副高外围 I 型	安徽省东南部处在副高边缘,北部有来自华北的低槽
副高外围 II 型	安徽省的等位势高度线较为平直,处在副高北侧边缘
台风倒槽型	台风尚在南海,但有低压槽伸展到安徽省
平直西风型	30°~40°N 存在平直的等高线,且安徽省周边区域不存在明显的高低压中心
内陆高压外围	安徽省的西北侧(青藏高原东北部到河套一带)为一个高压中心控制
高压脊	安徽省附近存在一个高压脊,但安徽省并不处在高压中心

表 5 各种结构对流云在不同天气类型下发生的次数

Table 5 Frequency of various structural convective clouds under different weather backgrounds

天气环流型	IC	CC	NL	BL	NS	TS	LS	PS	BE
低槽 I 型	12	6	3	0	5	5	0	1	0
低槽 II 型	12	10	14	1	7	11	2	3	1
副高控制型	7	3	2	0	1	2	0	0	0
副高外围 I 型	10	6	6	0	3	1	0	1	0
副高外围 II 型	6	5	12	1	4	2	1	1	0
台风倒槽型	4	2	1	0	1	2	0	0	0
平直西风型	2	1	1	0	0	0	0	0	0
内陆高压外围	0	0	2	0	0	0	0	0	0
高压脊	4	0	1	0	0	0	0	0	0

孤立对流云作为江淮地区高发的对流云类型,主要在三种天气背景下产生,图 4 是孤立对流云出现的三种主要天气形势,从图中可以看出,在低槽 I 型天气中,孤立对流云发生位置处于槽线尾端的前部,安徽省不受副高影响。在低槽 II 型天气中,孤立对流云发生位置处于槽线尾端的前部,副高中心西移超过 130°E,但是 588 线并没有到达安徽省内。在副高 I 型天气中,孤立对流云发生位置处于副高外围,安徽部分地区在 588 线之内,同时在华北地区

有一个低槽,安徽省处于槽线末端。

簇状对流云出现的三种主要天气形势和孤立对流云相似,簇状对流云也是主要在低槽 I 型、低槽 II 型和副高外围 I 型三种天气类型下出现。非线状对流云出现的主要天气类型和孤立、簇状对流云不同,虽然非线状对流云也在低槽 II 型和副高外围 I 型天气中生成,但是在副高外围 II 型天气中,产生非线状对流云的概率也很高。

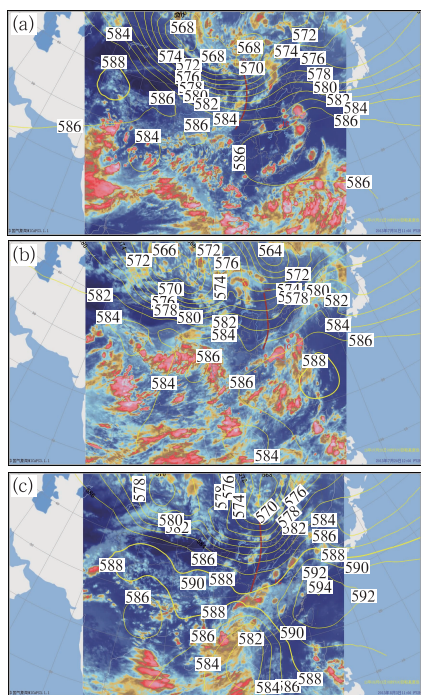


图4 孤立对流云出现几种主要天气形势及云图

(a)低槽 I 型, (b)低槽 II 型, (c)副高外围 I 型

Fig. 4 Several main weather backgrounds

when IC occurred and cloud images

(a) the trough I pattern, (b) the trough II pattern,

(c) the subtropical high I pattern

3 反射率与粒子落速分析

3.1 孤立对流云

调频连续波雷达是具有高时空分辨率探测雷达,垂直分辨率为 30 m,所以该雷达能够更加准确地探测对流云结构在垂直方向上的变化(阮征等, 2015),图 5 是发生在安徽定远的一次孤立对流多普勒雷达回波图,对流发生时间为 2013 年 7 月 20 日上午。图 6 是该孤立对流云的连续波雷达反射率和降水粒子下落速度,从图 6a 中可以看出,孤立对流云出现时,云内回波在横向上呈波状排列,回波强度从前到后依次加强,可以推断前面的云体为新生云体,处于初始阶段,从云中到地面回波减弱,说明降水粒子从出云到落地过程中,可能通过蒸发和破碎等过程,粒子粒径和密度减小,进而导致了回波减弱。而后面的云体已经发展成熟,从云中到地面回波没有减弱,说明云系降水处于成熟期,降水粒子从

出云到落地的过程中,粒径和密度可能并没有明显减少,所以回波并没有减弱。同时孤立对流上部有典型的云砧出现,这主要是受高空风的影响,在云砧后部形成出流区。从图 6b 中可以看出,孤立对流云降水粒子的垂直落速从云顶开始逐渐增加,随着高度的降低,孤立对流云前面的云体落速减小,后面的云体降水粒子保持最大落速触地,最大落速为 $13.3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,同时可以看出粒子速度轨迹呈现倾斜式分布。在前人的研究中也存在类似结论,Black et al (2003)利用飞机探测资料分析对流结构时发现,在 12 km 高度云中降水粒子下落速度最大达到 $13 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。Lerach et al(2009)利用北美季风试验

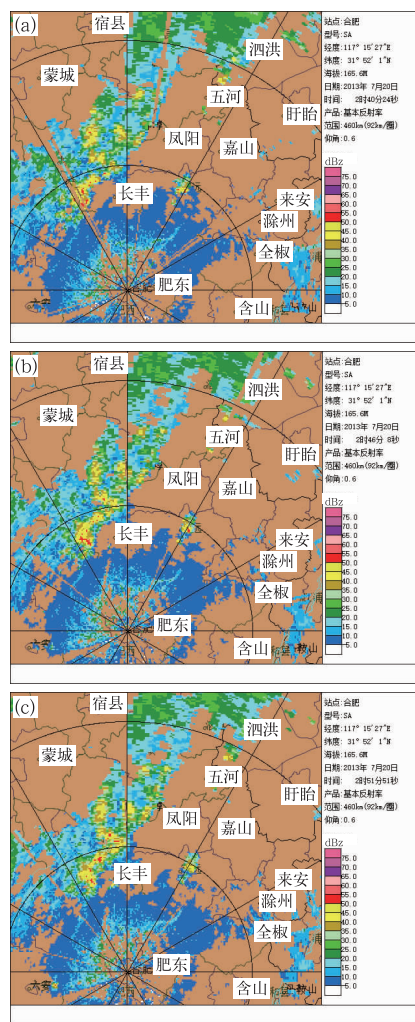


图5 2013年7月20日合肥雷达
0.5°仰角 IC PPI 图像

(a)10:40, (b)10:46, (c)10:51

Fig. 5 IC PPI images of Hefei Radar with elevation of 0.5° at (a) 10:40 BT, (b) 10:46 BT, (c) 10:51 BT 20 July 2013

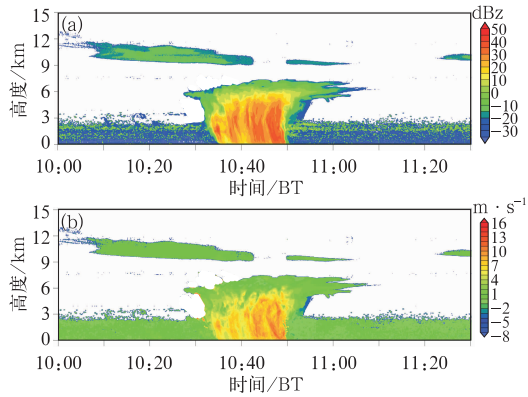


图 6 孤立对流云连续波雷达反射率(a,单位: dBz)和降水粒子下落速度(b,单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
Fig. 6 IC reflectivity detected by the C-FMCW radar (a, unit: dBz), falling speed of IC precipitation particle (b, unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)

(North American Monsoon Experiment, NAME) 获取的雷达数据分析对流云垂直结构时发现, 对流云降水粒子下落速度范围为 $3 \sim 10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 同时发现速度轨迹往往呈现倾斜式分布。Heymsfield et al (2010) 利用机载雷达分析对流云垂直结构时发现, 云中降水粒子最大下落速度位于 5 km 高度处, 最大下落速度达到 $13 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。用调频连续波雷达观测的对流云粒子最大下落速度与 Black et al (2003) 和 Heymsfield et al (2010) 观测结果相近, 而粒子速度轨迹呈倾斜式分布与 Lerach et al (2009) 研究结果一致。

3.2 簇状对流云

簇状对流云是多个对流单体成簇状同时出现的对流系统, 图 7 是发生在安徽定远的一次簇状对流多普勒雷达回波图, 对流发生时间为 2013 年 7 月 22 日上午, 图 8 是调频连续波雷达观测的该簇状对流云回波结构(图 8a)和降水粒子下落速度(图 8b), 从图中可以看出, 08:40—10:10, 多个对流单体移过连续波雷达上空, 不同回波强度对流云同时存在, 整个簇状对流云系统整体偏弱, 回波顶高大部分低于 6 km。簇状对流云降水粒子落速随着高度的降低, 速度逐渐增加, 但云体下部的主要落速集中在 $4 \sim 8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 最大下落速度为 $8.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

3.3 非线性状对流云

非线性状对流以积层混合云出现的形式较多, 图

9 是发生在安徽定远的一次非线性状对流多普勒雷达回波图, 对流发生时间为 2013 年 7 月 7 日上午,

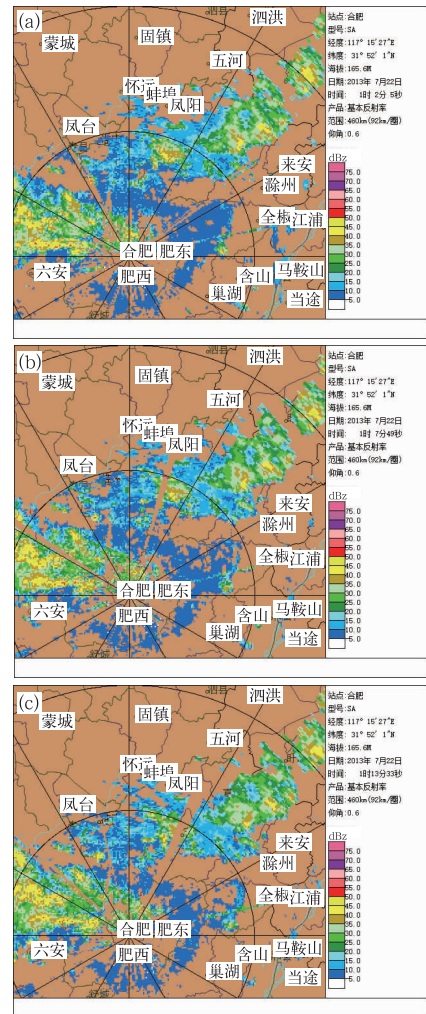


图 7 同图 5, 但为 2013 年 7 月 22 日 CC
(a) 09:02, (b) 09:07, (c) 09:13

Fig. 7 Same as Fig. 5, but for CC at (a) 09:02 BT, (b) 09:07 BT, (c) 09:13 BT 22 July 2013

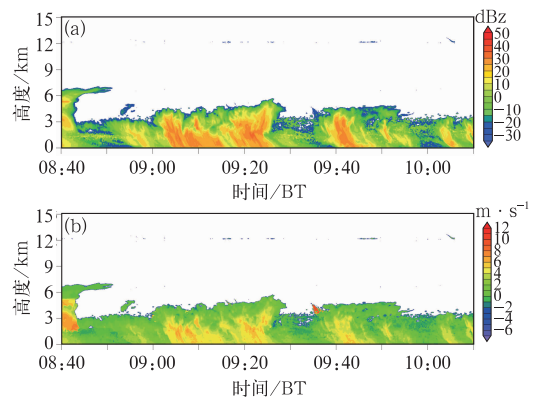


图 8 同图 6, 但为簇状对流云
Fig. 8 Same as Fig. 6, but for CC

图 10 是调频连续波雷达观测的该非线性状对流云回波结构(图 10a)和降水粒子下落速度(图 10b)。从图中可以看出,非线性状对流云出现时,对流云镶嵌在层云中,在层云区域存在清晰的粒子融化带,高度的波动范围为 $4.5 \sim 5.5$ km,主要范围集中在 $4.9 \sim 5.1$ km,嵌入对流云区域融化带没有层云区域明显,同时云顶高度参差不齐,嵌入对流云云顶高于周边层云云顶。由于非线性状对流云中包含层云,云系中存在明显的融化带,在融化带附近,降水粒子的垂直落速有一个快速变化的过程,融化带上部粒子下落速度普遍在 $0 \sim 2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,融化带下部,粒子下落速度普遍高于 $4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,最大下落速度为 $11.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,发生在嵌入对流云下部。

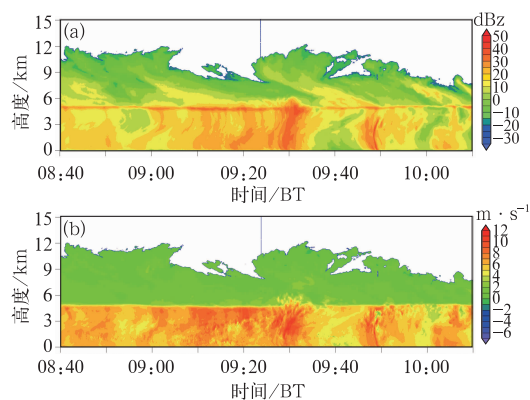


图 10 同图 6,但为非线性状对流云
Fig. 10 Same as Fig. 6, but for NL

4 结 论

利用安徽省内多普勒雷达组网数据,统计分析江淮地区 2013—2014 年 6—9 月发生的对流云结构特征,共找出 227 个对流云个例,将不同对流云按结构分为 9 类,并得到以下结论:

(1) 把江淮地区对流云按结构归类后发现,江淮对流云以孤立对流云、簇状对流云和非线性对流云为主,分别占总对流云数的 29.1%、18.1% 和 23.3%,8 月是江淮地区对流云高发期,同时也是孤立对流云发生最多的月份。江淮地区对流云多发生在午后 12—18 时,其中 16 时对流云的产生频率最高。

(2) 调查不同结构对流云产生的天气背景后发现,不同的天气背景条件下,主要发生的对流结构也不同,低槽 I 型天气下,主要以孤立对流云为主;低槽 II 型天气下,主要发生的对流以非线性状对流为主,同时由于低槽 II 型是江淮地区多发的天气类型,所以这种天气是各种对流的高发天气。孤立对流云和簇状对流云的高发天气包括低槽 I 型、低槽 II 型和副高外围 I 型,而非线性状对流云的高发天气除了低槽 II 型和副高外围 I 型,还包括副高外围 II 型。

(3) 调频连续波探测的对流云个例显示,孤立对流云出现时,云内回波在横向上呈波状排列,回波强度从前到后依次加强,同时孤立对流上部有典型的云砧出现,簇状对流云出现时,不同对流云呈现簇状排列,非线性状对流云出现时,对流云镶嵌在层云中,嵌入对流云顶高于周边层云顶。在降水粒子的垂直落速方面,孤立对流云降水粒子最大落速

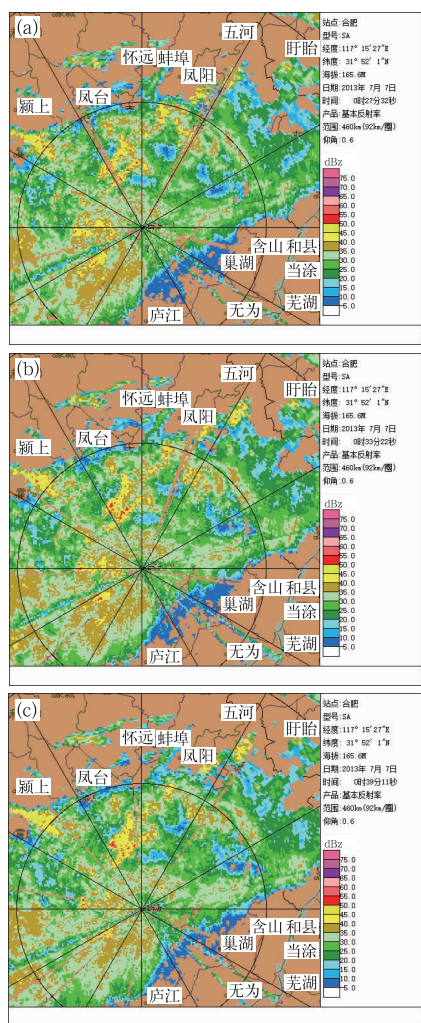


图 9 同图 5,但为 2013 年 7 月 7 日 NL
(a)08:27, (b)08:33, (c)08:39
Fig. 9 Same as Fig. 5, but for NL at
(a) 08:27 BT, (b) 08:33 BT,
(c) 08:39 BT 7 July 2013

为 $13.3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。簇状对流云降水粒子落速主要集中在 $4 \sim 8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 最大为 $8.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。而非线状对流云, 融化带上部粒子下落速度普遍在 $0 \sim 2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 融化带下部, 粒子下落速度普遍高于 $4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 最大下落速度为 $11.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 发生在嵌入对流云下部。

本文通过统计雷达数据分析对流结构类型及发生规律, 但是不同对流结构发生的物理机制还需要结合其他观测数据进一步研究, 另外调频连续波雷达属于新研发的观测仪器, 所以其测量的降水粒子最大下落速度值精度还有待于进一步对比验证。

参考文献

- 贾烁, 姚展予, 2016. 江淮对流云人工增雨作业效果检验个例分析[J]. 气象, 42(2): 238-245.
- 蒋年冲, 刘娟, 胡雯, 等, 2007. 安徽夏季中 γ 尺度对流云的雷达回波特征[J]. 气象, 33(10): 9-14.
- 刘黎平, 郑佳峰, 阮征, 等, 2015. 2014 年青藏高原云和降水多种雷达综合观测试验及云特征初步分析结果[J]. 气象学报, 73(4): 635-647.
- 阮征, 金龙, 葛润生, 等, 2015. C 波段调频连续波天气雷达探测系统及观测试验[J]. 气象学报, 73(3): 577-592.
- 覃丹宇, 黄勇, 李博, 等, 2014. 梅雨锋云系的模态研究 I: 主导模态[J]. 大气科学, 38(4): 700-718.
- 王晓芳, 崔春光, 2012. 长江中下游地区梅雨期线状中尺度对流系统分析 I: 组织类型特征[J]. 气象学报, 70(5): 909-923.
- 许焕斌, 2015. 人工影响天气科学技术问答[M]. 北京: 气象出版社, 138-140.
- 袁野, 冯静夷, 蒋年冲, 等, 2008. 夏季催化对流云雷达回波特征对比分析[J]. 气象, 34(1): 41-49.
- 郑淋淋, 孙建华, 2012. 干、湿环境下中尺度对流系统发生的环流背景和地面特征分析[J]. 大气科学, 37(4): 891-904.
- Barker H W, Stephens G L, Fu Q, 1999. The sensitivity of domain-averaged solar fluxes to assumptions about cloud geometry[J]. Quart J Roy Meteor Soc, 125: 2127-2152.
- Black R A, Heymsfield G M, Hallett J, 2003. Extra large particle images at 12 km in a hurricane eyewall: Evidence of high-altitude supercooled water? [J]. Geophys Res Lett, 30(21): 101-104.
- Bluestein H B, Jain M H, 1985. Formation of mesoscale lines of precipitation: severe squall lines in Oklahoma during the spring [J]. J Atmos Sci, 42(16): 1711-1732.
- Fu D, Guo X, 2011. A cloud-resolving simulation study on the merging processes and effects of topography and environmental winds[J]. J Atmos Sci, 69(4): 1232-1249.
- Fuhrer O, Schär C, 2005. Embedded cellular convection in moist flow past Topography[J]. J Atmos Sci, 62(8): 2810-2828.
- Gallus W A, Snook N A, Johnson E V, 2008. Spring and summer severe weather reports over the Midwest as a function of convective mode: a preliminary study[J]. Wea Forecasting, 23(1): 101-113.
- Heymsfield G M, Tian L, Heymsfield A J, et al, 2010. Characteristics of deep tropical and subtropical convection from Nadir-viewing high-Altitude Airborne Doppler Radar[J]. J Atmos Sci, 67(2): 285-308.
- Jakob C, Klein S A, 1999. The role of vertically varying cloud fraction in the parametrization of microphysical processes in the ECMWF model[J]. Quart J Roy Meteor Soc, 125(555): 941-965.
- Jirak I L, Cotton W R, McAnelly R L, 2003. Satellite and radar survey of mesoscale convective system development [J]. Mon Wea Rev, 131(10): 2428-2449.
- Lerach D G, Rutledge S A, Williams C R, et al, 2009. Vertical structure of convective systems during NAME 2004 [J]. Mon Wea Rev, 138(5): 1695-1714.
- Lombardo K A, Colle B A, 2010. The spatial and temporal distribution of organized convective structures over the Northeast and their ambient conditions [J]. Mon Wea Rev, 138(12): 4456-4474.
- Luo Y, Xu K M, Morrison H, et al, 2008. Arctic mixed-phase clouds simulated by a cloud-resolving model: comparison with ARM observations and sensitivity to microphysics parameterizations[J]. J Atmos Sci, 65(4): 1285-1303.
- Parker M D, Johnson R H, 2000. Organizational modes of midlatitude mesoscale convective systems [J]. Mon Wea Rev, 128(10): 3413-3436.
- Randall D A, Harshvardhan, Dazlich D A, 1989. Interactions among radiation, convection, and large-scale dynamics in a general circulation model [J]. J Atmos Sci, 46: 1943-1970.
- Slingo A, Slingo J M, 1988. The response of a general circulation model to cloud longwave radiative forcing. Part I: introduction and initial experiments [J]. Quart J Roy Meteor Soc, 114(482): 1027-1062.
- Wang J H, Rossow W B, 1998. Effects of cloud vertical structure on atmospheric circulation in the GISS GCM [J]. J Climate, 11(11): 3010-3029.