

江淮地区对流云结构特征分析

赵光, 吴汪毅

(安徽省人工影响天气办公室, 合肥 230031)

摘要: 对流云发展到一定时期,常常会产生一些强对流天气,如短时强降水、大风、冰雹等,这些灾害性天气往往会给农业生产带来不利的影响。多年来,人们一直致力于强对流天气的研究工作。作者利用合肥多普勒雷达 6 层仰角 (0.5,1.5,2.4,3.4,4.3,6.0) 的基本反射率、回波顶高、垂直积分液态水 (VIL) 每隔 6 min 的资料,分析了江淮试验区 2003 年 8 月 5 日对流云的初生、合并、发展、消散的演变过程,试图找出江淮地区对流云的结构特征。

关键词: 结构特征; 对流云; 回波强度

中图分类号: P426.5

文献标识码: A

文章编号: 1672-352X (2011)06-0961-05

Analysis of structural characteristics of convective clouds in Yangtze-Huaihe area

ZHAO Guang, WU Wang-yi

(Anhui Weather Modification Office, Hefei 230031)

Abstract: It will bring some strong convection weather such as short-range precipitation, strong wind, hail, and so on, when the convective clouds develop to a certain period. This disaster weather often exerts a negative effect in agricultural production. Researchers have been committed to the strong convective weather study for many years. In this paper, based on the Doppler 6-minute data in Hefei including the base reflectivity, echo tops, vertically integrated liquid (VIL) with 6-layer elevation (0.5, 1.5, 2.4, 3.4, 4.3, 6.0), the evolution process of convective clouds containing newborn, mergers, development and dissipation in Yangtze-Huaihe experiment area on August 5, 2003 are analyzed, trying to reveal the structure characteristics of convective clouds in this area.

Key words: structure characteristics; convective clouds; radar echo

对流云降水对地球上的水分平衡具有十分重要的意义,全球有 3/4 的雨水来自对流云。对流云是我国夏季的主要降水云系,由于云底温度较高,云中富含丰富的降水潜能。S 波段多普勒雷达使用以来,大量的观测事实,使人们对对流云的分析研究进入新的阶段^[1-4],进一步加深了对对流云结构的认识。

2003 年 8 月 5 日 16 时,安徽省凤阳县和定远县的 6 个乡镇遭受大风、暴雨侵袭,局部地区出现了冰雹。据统计,这次过程受灾人口约 3 万人,有人员伤亡,损坏房屋千余间,农作物受灾面积 6 万亩,直接经济损失 3 200 万元,其中农业经济损失 2 000 万元。

多块对流云合并是对流云发展的基础^[5-10]。本文细致地分析了这次过程对流云发生、发展的变化

结构特征,所得结论对江淮地区对流云的监测预警有一定的促进作用。

1 材料与方法

1.1 观测设备

安徽省合肥 S 波段多普勒雷达探测范围广(强度场探测最佳范围 230 km,最大范围可达 460 km),探测精度高(速度场最高分辨率可达 250 m)。多普勒雷达的基本产品有 3 种:①基本反射率(base reflectivity)也即基本强度场,半径 460 km,分辨率 1 km。误差为 0.5 dBZ。②基本平均径向速度(mean radial velocity),半径 230 km,分辨率 250 m。误差为 0.5 m·s⁻¹。③谱宽(spectrant)半径 230 km,分辨率 250 m。以上每个产品均有 14 层资料,扫描仰角从 0.5° 到 19.5°。误差为 0.5 m·s⁻¹。

1.2 材料

多普勒雷达 6 层仰角 (0.5, 1.5, 2.4, 3.4, 4.3, 6.0) 的基本反射率、回波顶高、垂直积分液态水 (VIL) 每隔 6 min 的资料。

1.3 计算方法

多普勒雷达应用产品垂直积分液态水含量 (VIL) 的计算方法^[11]:

在一定假设的基础上^[12], 降水云内雨滴直径分布符合 M-P 分布, 即:

$$N(D) = N_0 \exp(-\Lambda D) \tag{1}$$

其中 D 为雨滴的直径, N_0 、 Λ 为 M-P 参数。

雷达积分因子 Z 定义为:

$$Z = \int_0^\infty N(D) D^6 dD \tag{2}$$

将 (1) 代入 (2) 可以得到

$$Z = \int_0^\infty N_0 \exp(-\Lambda D) D^6 dD = N_0 \frac{\Gamma(7)}{\Lambda^7} \tag{3}$$

对于雨滴谱来说, 一个直径为 D 的雨滴的质量为 $\frac{\pi}{6} \rho D^3$ (ρ 为液态水的密度),

则单位体积内含有的雨滴个数 $N(D)$, 其质量的和即为液态水含量:

$$M = \frac{\pi}{6} \rho \int_0^\infty N_0 \exp(-\Lambda D) D^3 dD = \frac{\pi}{6} \rho N_0 \frac{\Gamma(4)}{\Lambda^4} \tag{4}$$

取雷达积分因子 Z 为 $\text{mm}^6 \cdot \text{m}^{-3}$, Λ 为 cm , 密度 ρ 为 $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$, N_0 为 cm^{-4} , 液态水含量 $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。

由 (3) 和 (4) 式可以得到:

$$Z = AM^B$$
$$A = \frac{10^{12} N_0 \Gamma(7)}{[\frac{1}{6} \rho 10^6 N_0 \Gamma(4)]^{7/4}}$$

$$B = 1.75$$

$$\text{由此得到 } M = 3.44 \times 10^{-3} Z^{\frac{4}{7}} \tag{5}$$

多普勒雷达以不同的仰角做锥体扫描, 从而形成很多分层的基本产品(强度、速度、谱宽)。要计算垂直积分液态水, 则要对单位面积上做垂直线积分, 可得:

$$VIL = \int_0^\infty M dh = \int_0^\infty 3.44 \times 10^{-3} Z^{\frac{4}{7}} dh$$

将实际体扫回波强度数据进行离散求和, 在某距离上相邻两个仰角之间的高度间隔内, 取两个仰角的回波强度平均值求和计算:

$$VIL = 3.44 \times 10^{-3} \sum_{i=1}^{N-1} \left(\frac{Z_i + Z_{i+1}}{2} \right)^{\frac{4}{7}} \Delta h_i$$

其中 N 为体扫的层数, Z_i 为第 I 个仰角的回波强度, Δh_i 为相邻仰角的高度差。

合肥多普勒雷达采用 11 模式进行体积扫描, 共扫描 14 层, 扫描仰角分别是 0.5°、1.5°、2.4°、3.4°、4.3°、5.3°、6.0°、7.5°、8.7°、10°、12°、14°、16.7° 及 19.5°。由于体扫回波强度的分辨率是 1 km, 因此 VIL 的分辨率是 1 km², 单位是 kg·m⁻²。

dBZ 总数为各回波块的 dBZ 累积和。VIL 的总数为各 VIL 的累积和。

2 对流云的初生和合并

在多普勒雷达的回波顶高图上, 11:53:30, 在凤阳县西南部 (117 度 16 分 20 秒, 32 度 38 分 58 秒) 出现第 1 个回波 (图 1a), 有 3 个象素块, 分别为 2 km, 3 km 和 5 km, 定义为 A 回波; 11:58:59 在凤阳县南部 (117 度 38 分 46 秒, 32 度 38 分 38 秒) 出现第 2 个回波 (图 1b), 高度均为 6 km, 定义为 B 回波; 12:04:26, A、B 回波均快速增长, 在 A、B 回波中间, 出现 C 回波 (117 度 27 分 58 秒, 32 度 37 分 17 秒) (图 1c), A 回波发展到 8 km。12:09:58, A、B、C 回波继续发展, A 回波顶高为 9 km, 12:15:29, 3 块回波合并成 D 回波 (图 1d)。D 回波成东西带状, 东西长度约 75 km, 南北宽度约 14 km, 之后 D 回波继续发展, 12:32:11, 有 2 个顶高为 14 km 的中心, 分别在回波的西部和东部。13:02:36, D 回波在西部出现 17 km 高的高度中心, 稳定少动。至此, 回波通过自身增长和合并, 形成对流云。

合肥多普勒雷达为新一代多普勒雷达, 精度高, 敏感性强, 能够探测到大气中的湍流变化。根据观测经验, 大于 18 dBZ 以上的回波才能形成地面降水, 30 dBZ 以上的回波能形成稳定的连续性降水, 50 dBZ 以上的回波能形成强对流性降水。作者以 30 dBZ 和 50 dBZ 的总数与面积来判断对流云的结构 (表 1)。

从表 1 可看出, 对流云回波在 2 700 m 高空初生, 属暖积性对流云, 之后, 对流云迅速增长到 5 500 m 高度。初生 11 min 后, 从 1 100 m 高度到 5 500 m 高度都出现 30 dBZ 以上的稳定降水回波, 对流云的厚度有 4 400 m; 初生 16 min 后, 对流云发展到 7 000 m 高度, 同时在 1.5、2.4、3.4、4.3 这 4 个仰角出现 50 dBZ 的强回波区; 12:15:29, 即在对流云初生 22

min 后, 除 6.0 度仰角没有 50 dBZ 强回波区以外, 从 1 100 m 高度到 11 000 m 高度都出现 30 dBZ 以上和 50 dBZ 以上的回波区。

从表 1 还可看出, 30 dBZ 以上和 50 dBZ 以上

的回波区的 DBZ 总数和面积的大值都出现在 5 500 m 高度和 4 000 m 高度的对流云中层位置, 这说明对流云的强中心出现在对流云的中间部位, 对流云的形状呈上下细、中间粗的纺缍状。

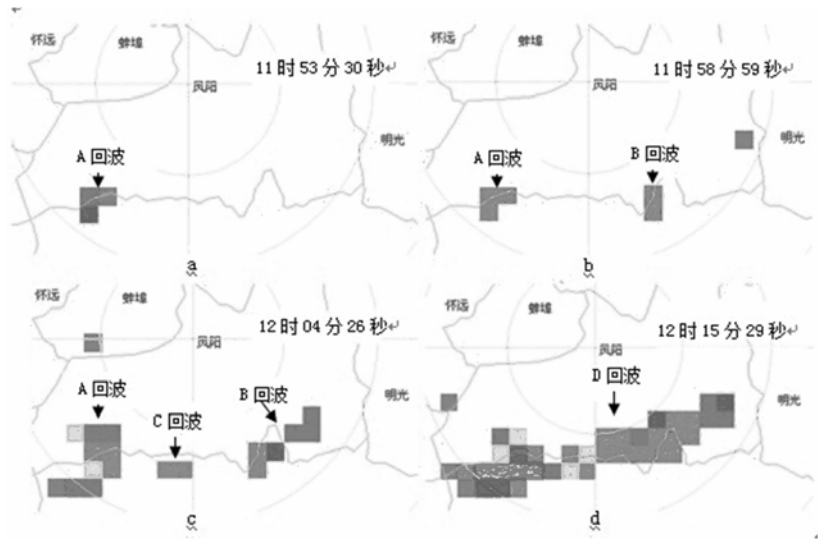


图 1 对流云的初生和合并

Figure 1 The birth and consolidation of the convective clouds

表 1 回波各层仰角的 30 dBZ 和 50 dBZ 总数 (dBZ) 与面积 (km²)

Table 1 Radar ehco with 30 dBZ and 50 dBZ on each elevation totality and area

平均高度/m Average altitude	仰角(°) Elevation	回波强度/dBZ Radar echo	11:47:42	11:53:00	11:58:59	11:58:59	12:09:58
1 100	0.5	30	<30 dBZ	<30 dBZ	<30 dBZ	30/1	480/14
		50					
2 700	1.5	30	<30 dBZ	60/2	130/4	284/8	7 155/172
		50					110/2
4 000	2.4	30	最大 15	最大 15	70/2	564/16	2 503/68
		50					300/6
5 500	3.4	30	无回波	最大 15	60/2	586/17	2 676/69
		50					567/11
7 000	4.3	30	无回波	无回波	最大 15	最大 15	1 832/47
		50					369/7
11 000	6.0	30	无回波	无回波	无回波	无回波	最大 15

平均高度/m Average altitude	仰角(°) Elevation	回波强度/dBZ Radar echo	12:15:29	12:21:00	12:26:32	12:32:11	12:40:02
1 100	0.5	30	2 423/66	4 917/126	7 639/196	9 703/241	10 539/262
		50	300/6	1 277/25	1 550/31	2 454/49	2 000/40
2 700	1.5	30	4 205/105	7 155/172	9 486/233	11 850/286	12 603/298
		50	1 304/25	2 949/54	3 052/59	3 633/70	4 999/97
4 000	2.4	30	4 622/113	7 302/175	9 903/240	10 577/253	11 888/282
		50	1 228/23	3 268/61	3 823/75	3 832/74	5 084/99
5 500	3.4	30	3 852/95	5 279/127	7 588/188	7 947/194	9 476/238
		50	1 325/25	1 803/33	2 150/42	2 537/49	2 204/42
7 000	4.3	30	1 945/49	2 175/61	3 060/84	4 399/117	6 432/173
		50	526/10	419/8	359/7	736/14	1 256/24
11 000	6.0	30	150/5	347/11	552/17	1 233/37	3 445/102

3 对流云的发展、合并和移动

在多普勒雷达的回波顶高图上, 13:07:54, 对流云原地增长, 范围扩大, 回波带形成回波团, 东西长度约 90 km, 南北长度约 35 km; 13:19:00, 17 km 的高度中心出现在回波团的中心位置; 13:24:27, 回波团略有东移; 13:47:27, D 回波团在缓慢东移过程中合并东部的零散对流回波; 14:26:37, 再次与东部的一大块对流回波合并; 14:32:14, 开始明显东移; 15:28:31, 出现 18 km 的高度中心, 回波发展到旺盛阶段; 15:45:12, 18 km 高度的回波逐渐消散, 旺盛阶段结束。

表 2 移动速度 (20 度移向)

Table 2 Movement speed of clouds (20°) $\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$

时间 Time	距离 Distance	时间 Time	距离 Distance
14:32:14	150	15:35:41	185
14:38:04	154	15:45:12	187
14:43:25	156	15:50:43	190
14:58:56	157	15:56:15	198
14:54:29	162	16:01:42	202
15:00:01	165	16:07:31	204
15:05:33	167	16:13:15	206
15:11:12	172	16:21:30	210
15:16:59	173	16:27:05	215
15:22:47	174	16:32:36	217
15:28:31	178	16:38:07	218
15:34:09	182	16:43:38	219

表 2 为对流云原地发展后, 14:32:14 开始每个时次的移动速度 (距离为 20° 方向回波最东部位与雷达中心的距离)。从表 2 可计算出, 回波基本上向正北偏东 20 度方向移动, 回波移动速度比较均匀, 平均移动速度为 $31.6 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 。

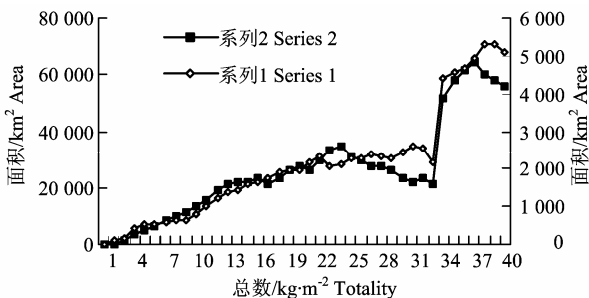


图 2 各时次回波 VIL 的总数和面积分布

Figure 2 The totality and area of vertically integrated liquid at times

从 11:58:58 VIL 初现到 15:39:41 回波达到旺盛时期, 有共计 3 h 41min, 41 个时次 (平均每隔 6 min) 的 VIL 回波图。图 2 是 41 个时次回波 VIL 的总数 ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$) 和面积 (km^2) 双折线分布图, 图中系列 2 是回波 VIL 的总数值, 系列 1 是回波 VIL 的面积值。

从图 2 可看出, 初生的对流云 VIL 总数增长迅速, 第 1 时次 (11:58:58) 为 $17 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$, 第 2 时次 (12:04:26) 为 $140 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$, 第 3 时次 (12:09:58) 为 $1700 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$, 到了第 12 时次 (13:02:36) 为 $19158 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$, 也即经过 64 min 的时间, 对流云 VIL 总数增长了 100 倍。在 14:09:32, 对流云继续增长, VIL 达 $34943 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$, 成为第 1 个高峰, 随后数值逐渐下降。如果只是单个对流云的话, 这个对流云将会很快消散, 但时间到了 15:05:33, 对流云合并了东部的一块云区, 再次迅速增长, 在 15:22:47 到达第 2 个高峰, VIL 为 $64444 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$, 这也是整个对流云发展的旺盛时期。

对流云 VIL 的面积变化趋势比起 VIL 总数的增长要显得平缓, 虽然也有 2 个高峰, 但都相对滞后几个时次。由此可看出尽管对流云因降水其能量有所释放, 但回波面积变化较小。

4 对流的消散

在多普勒雷达的回波顶高图上, 从 16:50:19 开始, 14 km 的回波顶高中心消失, 最高高度变为 12 km, 虽然 12 km 的回波范围较大, 但没有高度中心的出现, 高度均匀; 之后回波范围逐渐缩小, 总回波面积缩小并分裂, 17:58:10, 回波分裂成 2 块, 18:37:33, 西部这一块基本消散。

5 结论

对流云的初生是由 3 块小单体合并而成, 对流云回波在低空初生, 属暖积性对流云。云体通过自身增长和合并, 形成对流云。

通过雷达回波多层分析可以看出对流云的形状, 对流云呈上下细、中间粗的纺缍状。

对流云原地增长, 范围扩大, 回波带形成回波团, 再次与东部的对流回波合并后发展到旺盛阶段。对流云移动速度比较均匀, 平均移动速度为 31.6 km/h 。

对流云 VIL 总数增长有 2 次高峰, 1 次是自身的生长, 另一次是合并其它对流云后的增长。对流云消散时期的基本反射率、回波顶高、垂直积分液态水含量其减弱比较平缓。

垂直积分液态水含量(VIL)区域分布和实际的降水区域有较好的对应关系, VIL 总数达到峰值往往是对流云发展的旺盛时期, 这时常常会出现强对流天气如短时强降水、大风、冰雹等。

参考文献:

- [1] 刘黎平, 邵爱梅, 葛润生, 等. 一次混合云暴雨过程中尺度结构的双多普勒雷达观测研究[J]. 大气科学, 2004, 28(2): 278-284.
- [2] 曹玲, 窦永祥, 杨晓玲, 等. 新一代天气雷达在河西走廊强对流天气预报中的应用[J]. 干旱气象, 2007, 25(04): 30-35.
- [3] 孙瑞, 杨松福, 郑芬. 应用雷达回波分析云南省文山州对流云阵性降水[C]//2004 年滇桂黔三省区五州市气象协作区交流会特刊论文集. 2004.
- [4] 陈秋萍, 曾光平, 冯宏芳, 等. 利用雷达回波资料对夏季对流云降水的初步探讨[J]. 应用气象学报, 2002, 13(3): 349-346.
- [5] 黄勇, 胡雯, 何永健. 安徽省副高控制下对流云特征分析[J]. 安徽师范大学学报: 自然科学版, 2008, 31(05): 479-482.
- [6] 吴玉霞, 洪延超, 雷恒池. 夏季对流云初期回波与降水之间的关系[J]. 大气科学, 1984, 8(01): 89-95.
- [7] 冯宏芳. 福建省夏季单体和多单体合并对流云结构特征与人工增雨潜力研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2006.
- [8] 楼小凤, 胡志晋, 王广河. 对流云降水过程中地形作用的数值模拟[J]. 应用气象学报, 2001, 12(S1): 113-121.
- [9] 熊华南, 张国君, 周益辉. 湖南省 2001 年夏秋季对流云降水潜力数值模拟结果[J]. 应用气象学报, 2003, 14(S1): 110-117.
- [10] 仲凌志. 层状云和对流云雷达回波的自动识别及其在估测降水中的应用[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2006.
- [11] Greene D R, Clark R A. Vertically integrated liquid water a new analysis tool[J]. Monthly Weather Review, 1972, 100(7): 548-552.
- [12] 胡明宝, 汤达章. 多普勒天气雷达资料分析与应用[M]. 北京: 解放军出版社, 2000: 146-149.

本刊外聘编委 黎志康研究员

中国农业科学院农作物基因资源与基因改良国家重大科学工程首席科学家、国际水稻研究所驻中国代表科学家和全球水稻分子育种协作网协调科学家。

专业特长: 植物分子遗传学(基因定位、数量性状遗传作图、植物分子标记辅助育种、功能等位基因发掘和复杂农艺性状的功能基因组研究)及其在水稻育种、遗传和进化中的应用。国际动植物基因组年会植物分子育种分会的主持人, 国际遗传学大会 Invited Speaker。是美国科学促进协会会员, 美国遗传学学会会员, 美国作物科学学会会员。

1974 年 10 月 - 1977 年 9 月就读于安徽农业大学, 1980 年 9 月 - 1983 年 8 月在中国农业科学院学习, 获硕士学位, 1985 年 1 月 - 1989 年 7 月在美国加州大学戴维斯校区学习, 获博士学位。1997 年 11 月 - 2003 年 7 月在国际水稻研究所遗传育种系任高级研究员, 2003 至今在中国农业科学院作物科学研究所工作, 任水稻分子遗传和育种研究员。

在国外曾主持过 8 个项目的研究, 总研究经费额达 300 多万美元。曾设计、策划并主持了有 11 个国家和 31 个研究所参加的“全球水稻分子育种计划”, 取得了重大的进展。目前主持的在研项目包括来自美国洛克菲勒基金的项目 2 项、国际农业研究中心挑战计划 1 项, 总研究经费额达 170 多万美元。此外还主持或承担国家科技部 973、863 和农业部 948 项目 3 项, 总研究经费额达 700 万人民币。