

文章编号: 1006-7639(2005)-03-0026-08

冰雹过程中闪电演变和雷达回波特征的综合分析

李国昌, 李照荣, 李宝梓

(甘肃省人工影响天气办公室, 甘肃 兰州 730020)

摘要:应用闪电定位网的资料和多普勒雷达资料,分析西北地区的降雹过程,详细讨论了 2004 年 5 月 15 日发生在兰州皋兰的一次降雹雷雨云的闪电演变、雷达回波特征和云特定参数之间的相互关系,对此雷雨云的闪电机理和电结构进行了分析推断。在皋兰产生降雹的个例分析表明,云中液态水含量是否出现高值区,是识别降雹开始的重要因子。在雷雨云移动路径上,总闪和云闪为线状分布,地闪集中分布在降雹区,云闪最多,地闪中绝大多数为负闪。综合计算降雹时段云参数分析表明,云中降水率和含水量对产生闪电相对敏感,推断这次雷雨云的电结构可能属于上正下负的偶极子型。

关键词:雷暴;闪电演变;强对流天气;雷达回波;液态含水量

中图分类号:P427.3

文献标识码:A

前言

雷暴是一种中小尺度的强对流天气系统,它出现时必有强烈的积雨云活动,往往有阵雨、冰雹、大风、龙卷风等伴生。产生雷暴的积雨云称雷雨云,在地面观测中,识别雷雨云是以是否出现闪电(光一闪和声一雷)进行判别,一旦有闪电出现,就认定是雷雨云^[4]。一个雷雨云叫做雷暴单体,它的水平范围约几千米到十几千米,持续时间几十分钟。雷雨云可以孤立分散出现,也可组成雷暴群,出现在几百千米至上千米的水平范围内,持续时间几小时至十几小时。Jayaratne^[1]等认为闪电的发生必须有非常强和深厚的上升气流才能促使过冷却水和冰粒混合态区出现电荷分离现象。Antory^[2]分析云地闪(以下简称地闪)特征和强龙卷之间的关系,指出超级单体中地闪发展趋势和龙卷的生成有明显相关性,地闪频数的峰值出现于龙卷生成前 10~20 min,地闪活动减弱发生于龙卷触地时。Richard^[3]等分析了 1992~1995 年美国地闪的密度,其中 1993 年美国中西部地区地闪密度达到峰值,超过 11 次/km²,和观测到的强降水相一致;Scott^[4]等研究美国中南部

地区夏季雷雨云中地闪与降水时也发现地闪与降水有较高的相关性。对雷达回波特征和闪电的相关关系,Buechler 和 Goodman^[5]通过观测分析 15 个风暴个例,得出一旦回波强度 40 dBz 部分温度达到 -10 °C 的高度,并且顶部回波超过 9 km,云体很快就会产生闪电。Michimoto^[6]认为 30 dBz 的云体达到 -20 °C 高度 5 min 后,出现第一次闪电,当 -10 °C 的强回波中心开始下降时,闪电活动最频繁。Kurt D. Hondl 等^[7]应用佛罗里达 1990 年 9 月 28 个雷雨云 Doppler 天气雷达资料和美国国家闪电探测网及肯尼迪航天中心 2 个雷电监测系统的闪电资料,对多普勒天气雷达临近预报初始雷雨云的形成和闪电触发可能性做了评估,发现在 0 °C 层附近的 10 dBz 回波,可能是将来发展成雷雨云最初部分,这个雷雨云的初始信号在高度上多与低空辐合,雷达回波顶的辐散相联系,初始信号出现时间和第一次闪电发生时间为 5~45 min,平均 15 min,应用这个初始信号指标可以监测到所有产生闪电的回波,反过来则不然,一些 0 °C 层产生 >10 dBz 回波云体不一定产生闪电。

应用完整闪电定位网的资料和多普勒雷达资料

收稿日期:2005-08-01;改回日期:2005-09-02

基金项目:甘肃省人工增雨防雹作业决策指挥系统(2002 人影-3)、国家科技攻关计划“西部开发科技行动”重大项目“祁连山空中云水资源开发利用研究”(2004BA901A16)和甘肃省气象局“云水资源及降水量时空分布的卫星遥感监测研究”(2001 人影-1-2)资助

作者简介:李国昌(1965-),男,甘肃会宁人,工程师,在读硕士,主要从事管理、科研工作。

分析西北的降雹过程,国内相关工作较少。本文详细讨论了2004年5月15日发生在兰州皋兰的一次降雹雷雨云的闪电演变、雷达回波特征和云特定参数之间的相互关系,对此雷雨云的闪电机制和电结构进行了分析推断。

1 数据来源和大气的垂直特征

雷达资料取自于设在兰州的CINRAD/CC(3830)多普勒雷达,数据平均间隔为7 min,扫描为14层,闪电资料取自设在中川的B型M-LDARS单站闪电定位仪和甘肃中部闪电定位网,文中所用的闪电资料均为该对流云中发生的闪电,闪电定位仪布点见图1。

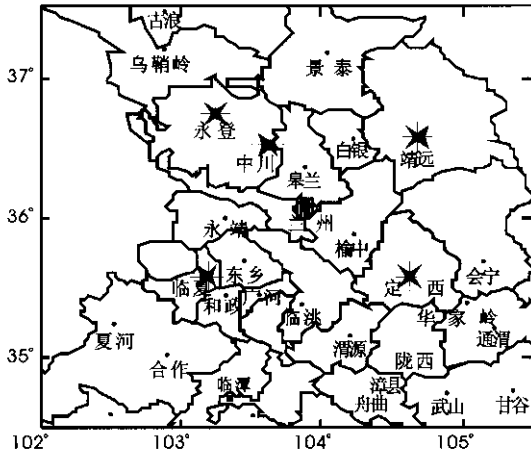


图1 闪电定位仪(*)和多普勒雷达(R)位置
Fig.1 The sites layout of lightning position network(*) and Doppler radar(R)

2 天气背景及灾情

2004年5月15日,受新疆东移冷锋的影响,在甘肃河西和中部地区,出现有利于对流云发展的天气背景,从河西地区由西向东,分别在民勤县泉山镇(8:30),永昌(9:19),古浪(11:00)出现降雹,最大直径4 mm,降水量1.3 mm,其中古浪县的17个村镇在11:00时产生大范围降雹。13:43~13:57分皋兰县的4个乡镇发生降雹,最大直径7 mm,降水量5.7 mm,15:30分在皋兰西面的中川机场降雹。10:00~14:00时的FY云图显示,在河西到甘肃中部,多处产生较大的对流云团,从西北向东南移动,其中以14时皋兰附近和永登境内的云团发展最为成熟,整体来看这次雷雨云过程强度较弱,云团组织性不

强。15日08时500 hPa高度图上,河西存在一高原槽,产生降雹的皋兰等地处于西北气流控制下,图2给出了08时榆中探空的温度、风向、风速和温度露点差的垂直变化。地面至高空,风向先顺转后逆转,风速逐渐增强,温度露点差8 km以下 $<3.2^{\circ}\text{C}$,说明中低层湿度较大,有较好的水汽条件,温度随高度递减,在海拔2.6 km处降为 0°C 。由于河西降雹点位于雷达探测范围或闪电探测范围之外,此次分析以在皋兰产生降雹的对流云团为重点,讨论闪电和雷达回波之间相互关系。

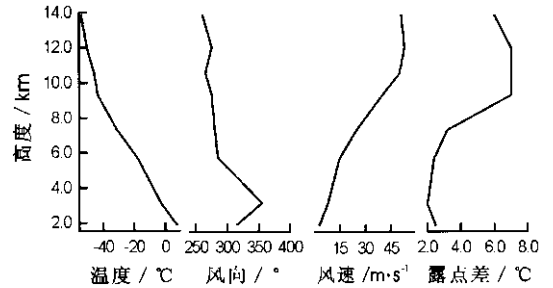


图2 大气的垂直特征(温度,风向,风速,露点差)

Fig.2 The vertical profiles of the atmosphere (temperature, wind direction, wind velocity, dew-point deficit)

3 雷雨云发展过程中雷达回波的演变

在皋兰产生降雹的对流云团,10:05在雷达正北92 km处出现第一块回波,距地面2.4 km,对比08时榆中站探空资料,对应温度为 -9.4°C ,回波面积逐渐增大,11:11~11:30,对流云团发展迅速,之后位置不动,回波面积增加缓慢,向东南移动,12:39~13:16分,回波显示出现多个 $>30\text{ dBz}$ 的小对流区域,12:50分每5 min闪电频次出现当日最高值17次,这与达到一定强度对流单体的数目密切相关。13:16分在皋兰正北的云团,中心回波迅速加强, $>30\text{ dBz}$ 的面积不断扩大,加快向南移动。13:43分开始降雹,13:57分结束, 30 dBz 以上的回波面积占了总回波的21.5%,14:10分强回波开始减弱,逐渐成为连片的弱回波区,14:45以后,此对流云团减弱为回波 $<30\text{ dBz}$ 的层状云区,整个过程持续约5 h。图3给出了主要发展阶段的回波。

除过回波,液态水含量是判别强降水及其降水潜力,强对流天气造成冰雹、暴雨等灾害性天气的有效工具之一。图4给出了此次雷雨云的液态水含量,最高值区域对应着降雹落区,在这次过程里,液态水含量 $>10\text{ kg/m}^2$ 后,马上开始降雹,降雹过程中, $<10\text{ kg/m}^2$ 的区域不断扩大,在降雹停止14 min后,该大值区消失。

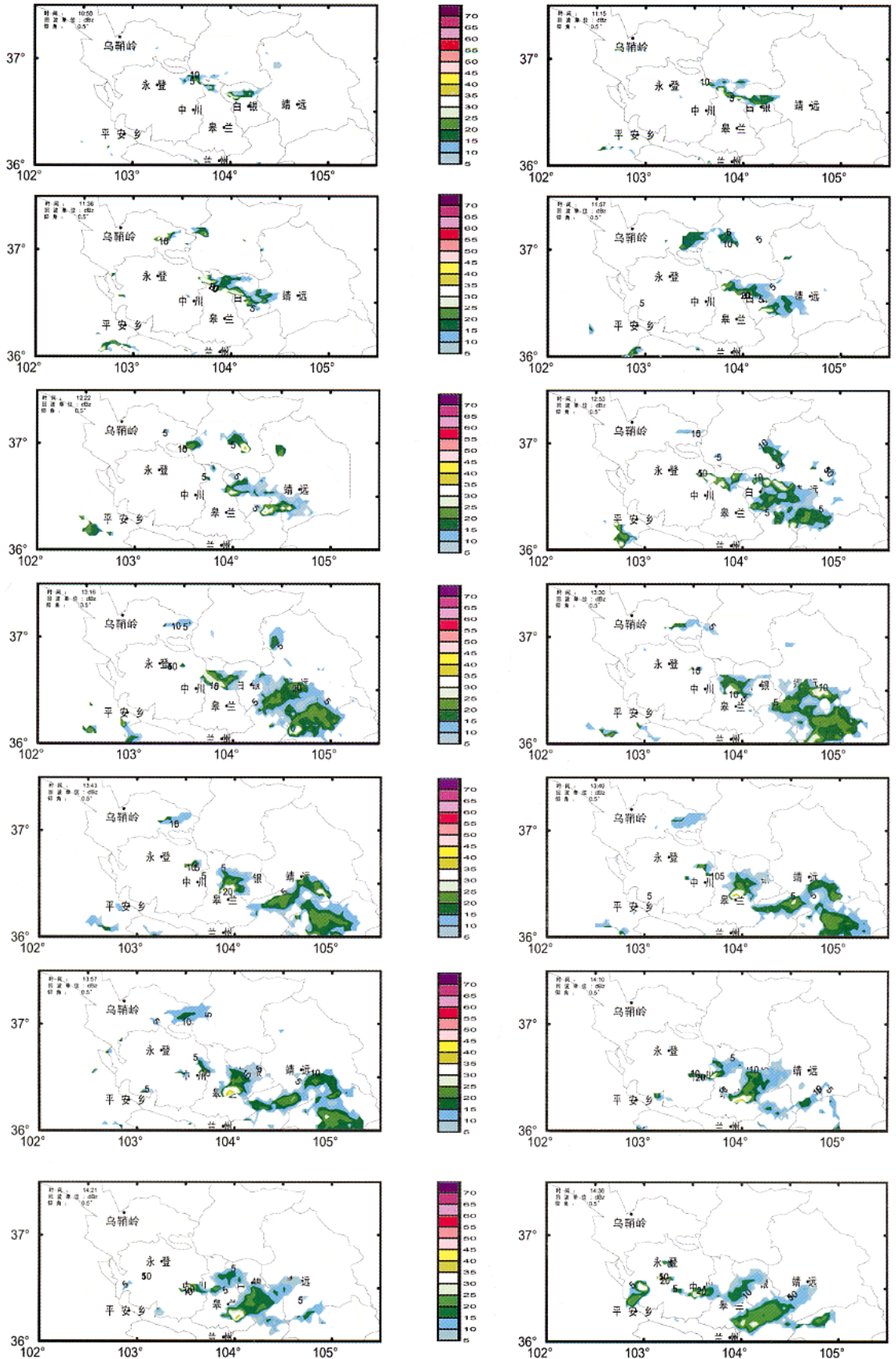


图3 雷雨云的回波演变(单位:dBz)

Fig. 3 The radar echo evolution of the thundercloud

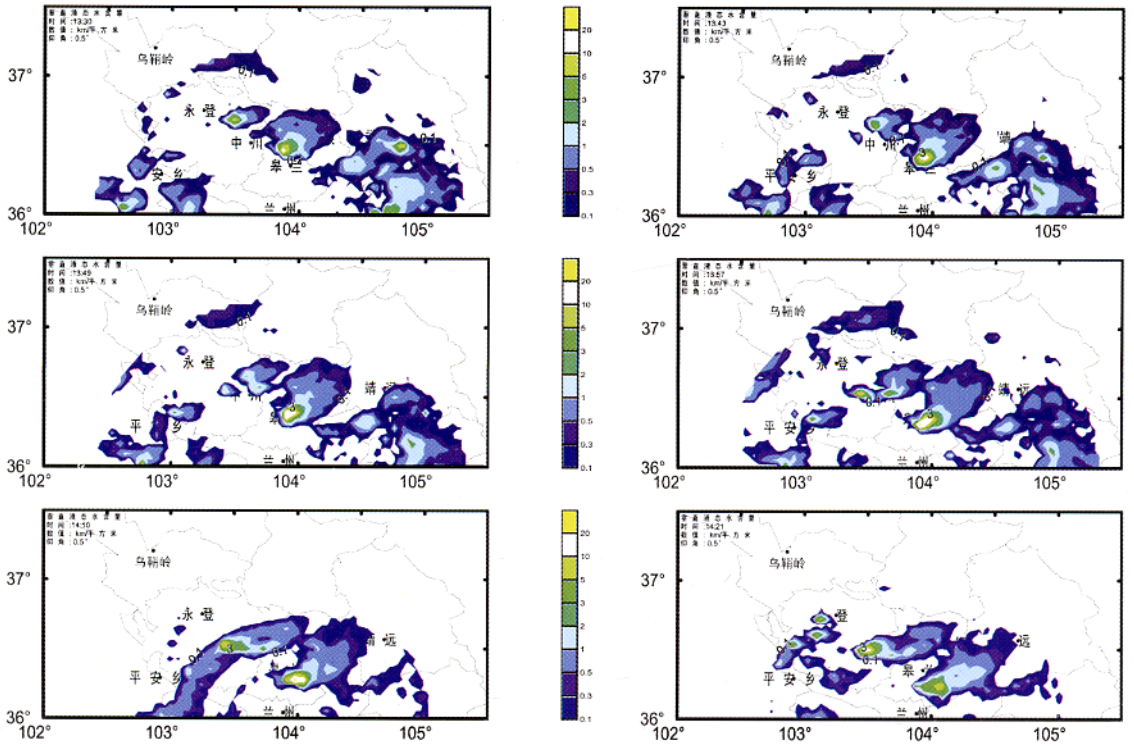


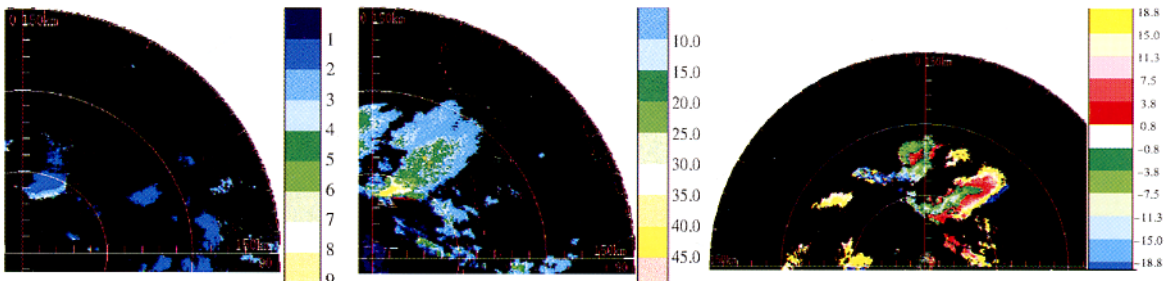
图 4 云中液态水含量(单位:kg·m⁻²)

Fig. 4 The cloud liquid water content(unit:kg·m⁻²)

4 雷雨云云结构分析

此块雷雨云在 13:43~14:10 发展成熟,整个云团从中川正北 30~40 km 开始向东南方向移动发展,13:43~13:57 该云团在皋兰境内 4 个乡的 17 个村镇产生降雹,图 5a 给出了 13:57 雷达回波底高,云团移动的下风方回波底高梯度变化很大,最前沿高度到达 4 km,主体云底回波高度为 1 km,前沿部位出现 2 km 和 3 km 均匀等值线区,图 5 b 是 13:57 分仰角 2.4°的回波,在其移动的下风方,沿矢径方向,回波呈“V”型边界,回波梯度大,说明这里就是该对流单体弱回波穹隆上边界。分析仰角为

0.5°、1.5°、2.4°、3.4°、4.3°、5.3°速度图认为,该对流云团中层 1.5~3.4 km 存在辐合,对应温度区为 2.8~-9.4℃,其特点为径向上正负速度呈中心对称,其间有零速度带,负中心和负区在零速度带的远距离一侧,正中心和正速度区在近距离一侧。由于云主体向东南方向移动,所以正速度偏小,初步判定为中小尺度的气旋辐合体。图 5c 给出同时刻仰角为 3.4°雷达速度图,雷达北偏东 37 km 处辐合最明显,1.5 km 以下全是负速度区,3.4 km 以上受高空西风的影响,云体边缘辐散特征明显,局部有气旋性风切变,综合起来,在云体的下风向,中低层有辐合,即对流的入流区,高层有辐散,形成新的上升气流。



(a)回波底高/km

(b)红线呈 V 型/dBz

(c)速度/m·s⁻¹

图 5 雷雨云的回波演变(13:35)

Fig. 5 The evolution of the thundercloud radar echo

5 闪电的时空分布

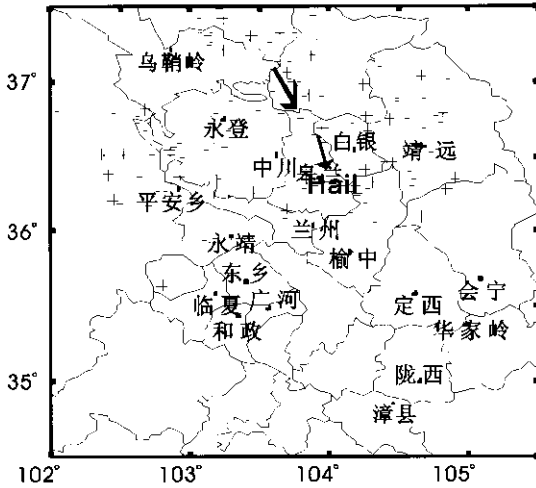
图 6 给出了 10:00~16:25 总闪、云闪和地闪的空间分布,图中的 Hail 位置是皋兰产生降雹的位置。这次过程总计观测到闪电 155 次,包括云闪 123 次,地闪 33 次,整个雷雨云发展、成熟到减弱过程中,仅有 2 次正地闪,占 6%。按照雷雨云的发展、成熟和消散减弱为层状云的过程,表 1 给出分时段

段的闪电数。

表 1 云体演变过程闪电次数

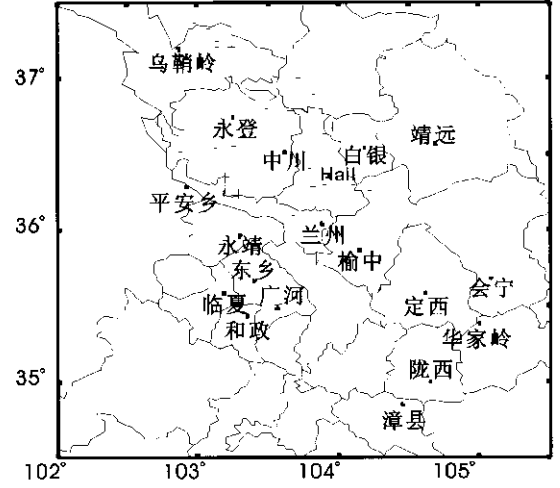
Tab. 1 The lightning—flash number during the evolution of the thundercloud

时段	总闪	地闪	云闪	云发展阶段
10:00~13:30	86	18	68	成长阶段
13:30~14:10	33	5	28	成熟阶段
14:10~15:10	45	10	35	消散衰减



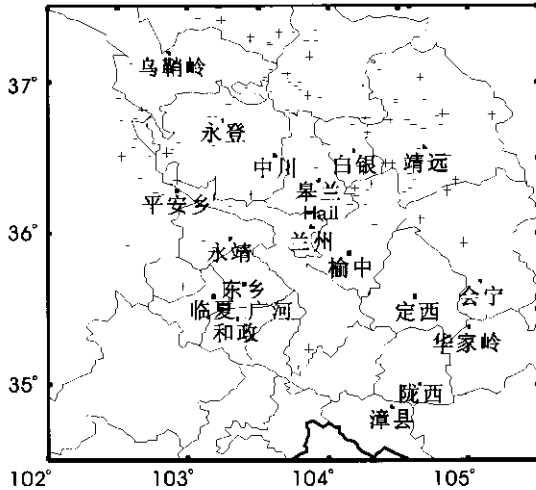
a. 总闪分布

a. Total lightning distribution



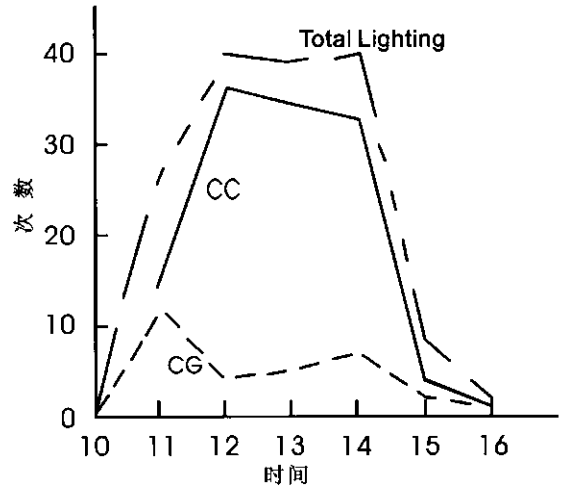
b. 地闪分布

b. Ground lightning distribution



c. 云闪分布

c. The distribution of cloud lightning



d. 总闪、云闪和地闪逐时变化

d. Hourly change of total, cloud and ground lightning

图 6 闪电的时空演变

Fig. 6 The temporal and spatial evolution of lightning—flash

在雷雨云发展移动路径上,用箭头标出,总闪和云闪呈线状分布,而地闪集中分布在降雹区。Carrey^[8]等用偏振雷达观测研究雷暴时指出,云闪与强上升气流顶的霰和冰雹累积有关,地闪与霰和冰雹

下降改变了负电荷中心高度有关。10:30~13:30分,是对流云团的成长阶段,期间移动了 60 km 左右,云闪频繁,与此阶段地形热力抬升,水汽迅速凝结和凝化,冰晶、霰、软雹甚至冰雹等浓度增大,利于

电荷累积和电场快速恢复有关。另外,对流云团移动过程中,不断与带电的小对流云团合并,也是造成云闪较多的原因。这次过程属于组织性不强的冰雹云,云体产生地面降雹持续了 14 min,最大回波顶高 9 km,最大雹粒只有 7 mm,表明缺乏有利雹云深度发展的天气条件,垂直气流也不会很强,降雹时的云地闪电均为负闪,归一化闪电电流强度 <60 。闪电次数的逐时变化(图 6d)也表明,云体发展的初期云闪居多,形成降雹云后,地闪增加很快。

图 7 是皋兰降雹云团降雹前后闪电频次和强度,在降雹时段 13:43~13:56,闪电频次不断增加,13:56 分时达到最大,之后骤减,2 min 后降雹停止,2 次闪电间隔最大为 50 s,最小为 10 s,67% 为负闪,相对强度为 31.2。降雹停止后的闪电频次虽然

出现一次 11 的大值,但 2 次闪电间隔时间明显增大,说明在降雹开始的初期,云中粒子荷电形成的电场,还不足以使大气电离,随着降雹的进行,更多的冰粒和雨滴通过碰撞和感应起电,电荷快速增加,大气电场容易达到触发闪电的临界值,并且很大的冰雹和雨滴数密度,使云地间的电场因闪电破坏后,恢复很快,闪电间隔很短,平均为 48 s,降雹末期,无论电荷的产生效率还是冰雹和雨滴的数密度,都已大大减弱,带电的凝水物粒子累积形成击穿电场需要更多的时间,闪电频次相应大大降低,闪电平均间隔时间为 88 s,见图 8。

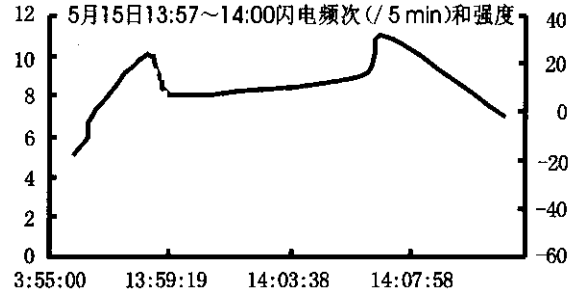
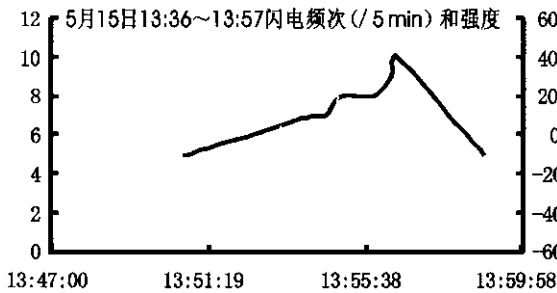


图 7 降雹时段的闪电频次和强度(实线为频次,虚线为归一化电流强度)

Fig. 7 The lightning frequency and intensity during the hail falling (solid line for frequency, dashed line for normalized intensity of electric current)

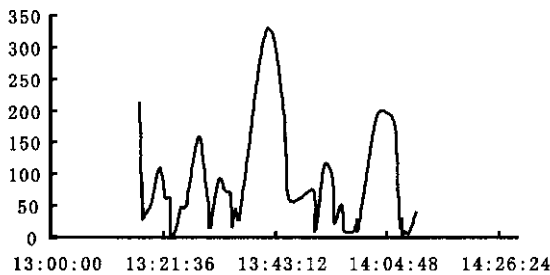


图 8 闪电发生的时间间隔(单位:s)

Fig. 8 The lightning interval(unit:s)

6 触发闪电的云参数

由于这次降雹过程较弱,地闪比较少,降雹时的第一个地闪于 13:50 分出现,归一电流强度为-31.5,应用 13:49 分的多普勒雷达资料,计算这次地闪发生前降水物的总浓度、尺度、平均落速和降水率分布。

设降水物满足 M-P 分布^[9]

$$N_D = N_0 e^{-\Lambda D} dD$$

式中 N_D 表示直径为 D 的粒子数, N_0, A 为常数。若以下标 I 表示冰雹, R 表示雨滴,取 $N_{0I} = 4 \times 10^{-4} / \text{cm}^4$, N_{0R} 为 $0.1 / \text{cm}^4$,根据含水量 W 的定义可得

$$\Lambda_R = \left(\frac{\pi \rho_R N_{0R}}{W_R} \right)^{0.25}, \quad \Lambda_I = \left(\frac{\pi \rho_I N_{0I}}{W_I} \right)^{0.25}$$

降水物总浓度为

$$\bar{N}_R = \int_0^\infty N_{0R} e^{-\Lambda_R D} dD = \frac{N_{0R}}{\Lambda_R}$$

$$\bar{N}_I = \int_0^\infty N_{0I} e^{-\Lambda_I D} dD = \frac{N_{0I}}{\Lambda_I}$$

质量加权平均半径为

$$\bar{r}_R = \frac{\int_0^\infty \frac{\pi D}{12} \rho_R D^3 N_{0R} e^{-\Lambda_R D} dD}{\int_0^\infty \frac{\pi}{6} \rho_R D^3 N_{0R} e^{-\Lambda_R D} dD} = 2 \left(\frac{\pi \rho_R N_{0R}}{W_R} \right)^{0.25}$$

$$\bar{r}_I = 2 \left(\frac{\pi \rho_I N_{0I}}{W_I} \right)^{0.25}$$

降水物在电场力、重力、阻力作用下的降落末速度为

$$V_R = \frac{4}{3} \pi r_R^3 g (\rho_R - \rho) + \frac{\bar{Q}_R E}{6 \pi \rho \nu \bar{r}_R \left(\frac{C_D Re}{24} \right)}$$

式中 Re 为雷诺数, C_D 为阻力系数, ν 为动粘系数, 取做 $1.44 \times 10^{-1} \text{ cm}^2/\text{s}$, ρ 为空气密度取 $1.2 \times 10^{-3} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。由上式可知降水物的降落速度包括 2 项, 第一项为重力所致, 第二项为电场力所致, 则

$$\bar{V}_R = \bar{V}_{R'} + \bar{V}_{R''} = \left[1 + \frac{3\bar{Q}_R E}{4\pi r_R^3 g (\rho_R - \rho)} \right] \bar{V}_{R'}$$

同样, \bar{V}_I 有类似公式

$$\bar{V}_I = \bar{V}_{I'} + \bar{V}_{I''} = \left[1 + \frac{3\bar{Q}_I E}{4\pi r_I^3 g (\rho_I - \rho)} \right] \bar{V}_{I'}$$

Scott 等根据大量实验资料得到 $r_R > 625 \mu\text{m}$, 雨滴降落速度 $V'_{R'}$ 与半径 r_R 经验关系为:

$V'_{R'} = 2 \times 10^3 r_R^{1/2} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$, 于是质量加权平均速度为

$$\bar{V}'_{R'} = \frac{\int_0^\infty \frac{\pi}{6} \rho_R D^3 N_D V'_{R'} dD}{\int_0^\infty \frac{\pi}{6} \rho_R D^3 N_D dD} = 2373 N_{0R}^{-1/8} W_R^{1/8} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$$

对于冰雹, 采用 Roos 等在垂直风洞里研究雹块下落得到的经验公式, 即:

$$\bar{V}'_{I'} = 2121 r_I^{1/2} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1},$$

得到质量加权平均速度为:

$$\bar{V}'_{I'} = 2543 N_{0I}^{1/8} W_I^{1/8} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1},$$

含水量 W 可以利用其与雷达反射因子 Z_e 之间的关系得到, 对于 M-P 分布有 $W_R =$

$$\left(\frac{Z_{eR}}{2.04 \times 10^4} \right)^{4/7}, \quad W_I = \left(\frac{Z_{eI}}{1.56 \times 10^6} \right)^{4/7},$$

其中 W 的单位为 $\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, Z_e 的单位为 $\text{mm}^6 \cdot \text{m}^{-3}$ 。

对单位时间降水物通过某高度上单位水平面的降水率 P , 则有 $P_R = 36000 W_R \bar{V}_R / \rho_R$, $P_I = 36000 W_I \bar{V}_I / \rho_I$

式中 P_R, P_I 的单位为 $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 。

以此地闪位置为中心, 用 13:49 分雷达数据计算得到 $0.03^\circ \times 0.03^\circ$ 范围内地闪发生前平均的冰雹浓度、尺度、质量加权速度和降水率, 13:56 分在降雹时产生第四个地闪, 极性与第一次闪电一样, 强度稍弱, 用 13:57 分雷达资料做同样云参数计算, 结果见表 2。降雹阶段第一个地闪发生前的平均云参数值, 全部大于本阶段最后一个地闪后的参数值, 比如降水率, 闪电前降水率为 4.94 mm/h , 在最后一次地闪后仅为 0.76 mm/h , 而含水量减少最快。为了找到对闪电变化的最敏感因子, 各量百分比变化用 Δ 表示, 见表 2 最后一行。首次地闪发生前和 4 次闪电后云参数的变化表明, 云中的降水率和含水量对产生闪电相对敏感, 雨滴和冰雹的浓度和尺度次之, 说明降水和降雹对地闪的发生起主要作用。所有 4 次地闪均为负闪, 且强度弱, 反映出这次雷雨云的电结构可能属于上正下负的偶极子型, 这与一些学者认为中国北方的雷暴呈三极结构有差异。

表 2 闪电前后云参数变化

Tab. 2 The cloud parameters change before and after lightning

时 段	含水量/ $\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$		浓度/ $\text{个} \cdot \text{m}^{-3}$		尺度/ cm		速度/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$		降水率/ $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$	
	雨滴	冰雹	雨滴	冰雹	雨滴	冰雹	雨滴	冰雹	雨滴	冰雹
13:49	$3.6\text{e}-2$	$3.0\text{e}-3$	$1.80\text{e}-3$	$1.83\text{e}-5$	$3.60\text{e}-2$	$9.17\text{e}-2$	3.67	5.75	4.94	1.30
13:57	$6.8\text{e}-3$	$5.7\text{e}-4$	$1.13\text{e}-3$	$1.16\text{e}-5$	$2.27\text{e}-2$	$5.79\text{e}-2$	2.85	4.47	0.76	0.20
Δ	-81.1%		-37.2%		-36.9%		-22.3%		-84.6%	

7 小 结

这次雷雨云产生于西北气流背景下, 属于组织性不强的弱对流混合云团, 初始从永登东北向东南方向移动发展, 在皋兰境内产生降雹, 出现液水含量 $> 10 \text{ kg/m}^2$ 高值区, 是识别降雹开始的重要因子。对流结构为中小尺度的气旋辐合体, 在云体的下风向, 中低层有辐合, 即对流的入流区, 高层有辐散。产生云闪最多, 地闪中绝大多数为负闪, 在雷雨云发展移动

路径上, 总闪和云闪呈线状分布, 地闪则集中分布在降雹区。综合计算降雹时段云参数分析表明, 云中降水率和含水量对产生闪电相对敏感, 推断这次雷雨云的电结构可能属于上正下负的偶极子型。

参考文献:

- [1] Stephen H odanish, David Sharp Waylon Collins. A 10-y Monthly Lightning Climate Florida: 1986-95[J]. Weather and Forecasting, 1997, 12(3): 439-448.
- [2] Antory H Perez, Louis J Wicker, Richard Orrille. Characteris-

- tics of Cloud-to-Ground Lightning Associated with Violent Tornadoes[J]. *Weather and Forecasting*, 1997, 12(3): 428-437.
- [3] Richard E, Orville, Alan c Silver. Lightning Ground Flash in the Contiguous United States; 1995-1997[J]. *Annual Summary Monthly Weather Review*, 1999, 127(11): 2693-2703.
- [4] Scott C Sheridan, John f Griffiths, Kichard E Orville. Warm Season Cloud-to-Ground Precipitation Relationships in the South-central United States[J]. *Weather and Forecasting*, 1997, 12(3): 449-458.
- [5] Buechler D E, Goodman S J. Echo size and asymmetry: Impact on NEXRAD storm identification [J]. *Appl Meteor*, 1990, (29): 962-969.
- [6] Michimoto K A. Study of radar echoes and their relation to lightning discharge of thunderclouds in the Hokuriku District Part 1: Observation and analysis of thunderclouds in summer and winter [J]. *J Meteor Soc Japan*, 1991, 69: 327-355.
- [7] Hondl Kurt D, Eilts Michael. Doppler radar signatures of developing thunderstorms and their potential to indicate the onset of cloud-to-ground lightning [J]. *Monthly Weather Review*, 1994, 122(8): 1818-1836.
- [8] Carey L D, Rutledge S A. A multiparameter radar case study of the microphysical evolution of a lightning storm [J]. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 1996, 59(1-2): 33-64.
- [9] 言穆弘, 葛正谟. 雷雨云极化降水起电机的一种计算[J]. *高原气象*, 2003, 2(3): 26-39.

Analysis between Lightning Evolution and Radar Echo Feature in Hailstorm Process

LI Guo-chang, LI Zhao-rong, LI Bao-zi

(Gansu Weather Modification Office, Lanzhou 730020, China)

Abstract : Using the lightning position network and Doppler radar data, a hailstorm occurred on May 15, 2004 over Gaolan county of Lanzhou city has been analyzed, especially, the relationship between lightning evolution and radar echo feature as well as cloud characteristic parameters of the thundercloud was discussed in detail, then the lightning mechanism and the structure of electric field of thundercloud have been analyzed. A case study of the hailstorm in Gaolan county indicated that if there was the maximum region of cloud liquid water content, then it could be an important factor to identify the beginning of hail falling. The total lightning and cloud lightning presented linear distribution over the moving track of the thundercloud, and the ground lightning concentrated in hail falling zone, the most ground lightning was minus. The analysis results show that the cloud precipitation efficiency and cloud water content were sensitive to generating lightning.

Key words: hailstorm; lightning evolution; severe convection weather; radar echo; liquid water content