第 27 卷 第 3 期 2007 年 6 月 Vol. 27, No. 3 Jun. ,2007

# 雷暴云电结构与闪电关系初探

罗 霞1 陈渭民1 李照荣<sup>2</sup> 胡胜娟<sup>3</sup> 李 旭<sup>3</sup>

(1江苏省气象灾害重点实验室(南京信息工程大学),南京 210044)(2甘肃省人工影响天气办公室,兰州 730020)(3 江苏省气象局,南京 210008)

摘 要 利用雷暴云偶极性电结构理论,结合卫星和雷达资料分析了不同荷电结构下地面电 场。结果表明:当正电荷中心高度越高、负电荷中心高度越低,形成的地面负电场越大,越有利于 地闪的形成;负地闪发生后或云砧下方,地面电场成正极性,易引发正地闪;地闪分布与雷达回波、 卫星云图中雷暴云位置基本一致,结合雷达和卫星资料可初步判断正/负地闪发生位置。

关键词 雷暴云荷电结构 地面电场 雷达回波 卫星云图 地闪

分类号 P427.32 文献标识码 A

## 引言

地闪是云与大地间的闪电,它是一个十分复杂的放电过程,不仅与云内的电荷分布有关,而且与地面特 征有关。但地表目标物基本是一固定的物体,起决定作用的主要是云中的电荷分布。云中的电荷分布是产 生云闪还是地闪的主要决定因素。Sadiku<sup>[1]</sup>(1994)研究了雷暴云偶极性和三极性电结构及地面电场。而随 着多普勒天气雷达和闪电监测系统的发展,对闪电资料、卫星资料和雷达观测资料的综合分析研究日益受到 关注。程向阳等<sup>[2]</sup>分柷了雷暴天气中多普勒天气雷达图的特征。Hondl 和 Eilts<sup>[3]</sup>(1994)检验了多普勒雷 达对雷暴的形成和云地闪电发生的临近预报能力。Roeder 等(1997)提出了闪电临近预报的雷达回波强度、 垂直厚度、回波顶高的参考指标<sup>[4]</sup>。利用地基闪电探测、空间闪电探测、地面电场观测等手段,获取了许多有 关闪电的现象,但资料还是十分有限,对雷电的研究大多局限于现象的罗列和描述,而对闪电物理原因的分 析很少。由于地闪是云内电荷与地面相反极性电荷的放电现象,而地表电荷密度取决于地面的电场强度。 本文计算了不同荷电结构下的地面电场强度,分析产生地闪的可能性,然后结合卫星和雷达资料分析闪电发 生时卫星云图和雷达回波的特点,利用卫星、雷达资料与闪电之间的关系,对闪电进行监测和预警。

## 1 基本原理

一般用偶极性电荷分布来描述雷暴云内电荷结构<sup>[5]</sup>。假定云内正负电荷分别集中分布在某一高度上, 且上方正电荷中心的电荷值为+Q<sub>P</sub>,中心高度为 H<sub>P</sub>,下方负荷电中心的电量为一Q<sub>N</sub>,中心高度为 H<sub>N</sub>。如 果把大地看成是一平面导体,从物理上分析,在点电荷 Q 的电场作用下,导体板上出现感应电荷分布。若 Q 为正的,则感应电荷为负的;若 Q 为负的,则感应电荷为正的。空间中的电场是由给定的点电荷 Q 以及导体 面上的感应电荷共同激发的。利用镜像法,测站点处地面电场 E<sup>[5]</sup>为

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \left[ \frac{2Q_P H_P}{(D_P^2 + H_P^2)^{3/2}} - \frac{2Q_N H_N}{(D_N^2 + H_N^2)^{3/2}} \right]$$
(1)

其中 D<sub>P</sub>、D<sub>N</sub>分别是测站点与云中正、负电荷中心在地面的投影点之间的距离。

**第一作者简介:**罗霞(1980-),女(汉),山西寿阳,硕士,现在南京信息工程大学大气物理学与大气环境专业,主要从事雷电原理研究 E-mail:luoxia\_80@163.com

收稿日期:2005-12-12;修改稿日期:2006-06-18

**基金项目:**本文由国家自然科学基金项目(编号:40275010)和江苏省气象灾害重点实验室(南京信息工程大学)项目(编号:KLME050101) 共同资助

## 2 计算结果分析

中尺度对流系统(MCS)是夏季重要的降水天气系统,同时它也是雷电发生最多、雷电灾害最重的系统之 一。从 Stolzenburg 等(1998)提出的 MCS 荷电概念模型可知,在 MCS 系统内的层状云区中,负电荷区向下可伸 展到 2 km;而在对流区内 5~6 km 为负荷电层,6~10 km 为正荷电层,并且负电荷主中心位于-10~-20 ℃之 间,如果这一温度层较低,对应的负电荷中心也较低<sup>[5]</sup>。假设雷暴云下方为平坦的大地平面,不考虑地形、空间 屏蔽层和气候特征等其它外界因素的影响,主要讨论中小尺度天气系统中雷暴云下地面电场特征。取云内电 荷量 Q 为 20C,分别计算了正/负电荷中心高度在 12 000 m/8 000 m、7 500 m/5 000 m、5 000 m/4 000 m、6 500 m/4 000 m、6 500 m/3 500 m、4 500 m/2 000 m 和 3 000 m/1 500 m 的 7 种情况下的地面电场值。

#### 2.1 高空无风切变时地面电场

如果不考虑高空风对雷暴云的影响,云内正负电荷中心在同一垂直线上,雷暴云下地面电场只受云内电 量和荷电中心高度的影响。

#### 2.1.1 不同荷电结构下地面电场分布

图 1 是以雷暴云内电荷中心在地面的投影点为坐标原点,取 7 种不同荷电中心高度时,雷暴云下地面电场分布图。

雷暴云中负电荷中心高度在 3 500 m 及以上时,地面电场变化较为缓慢,且电场值小于-20 kV/m。对 比曲线 3、4,负电荷中心高度相同,曲线 4 中正电荷中心高度比曲线 3 中增高 1500 m,此时地面负电场最大 值增加了约 6 kV/m;曲线 4、5 中正电荷中心高度取同一值,将负电荷高度降低 500 m,发现地面负电场增大 了约 7 kV/m,说明负电荷中心高度对地面电场的影响比正电荷的大。而曲线 6 和 7 相对于前面 5 条线而 言,地面电场变化迅速,特别是云内电荷中心高度较低时,雷暴云正下方地面电场值较大,例如曲线 7 中地面 电场值已达-120 kV/m。并且从式 1 可知地面电场与云内电荷量也成正比关系,当增大电荷量时,地面电 场值也会增大,但由于雷暴云内电荷量变化范围不大,因而电量对地面电场的影响不是很大。



Fig. 1 The electric field on the ground underneath different charge structure of thunderstorm

#### 2.1.2 雷暴云下强地面电场

如果不考虑高空风对雷暴云的影响时,云内正负电荷呈上下分布的垂直结构。当正负电荷中心高度较低时,地面将产生强电场。此时若不考虑其他因素的影响,利用式1计算得到的地面电场值如表1所示。

从表1可以分析得到以下几方面的特征:

(1)云中正/负电荷值小于 20 C 时,当负电荷中心高度在 500 m 时,不论云内电量及正电荷中心高度为 多少,地面电场强度均在-300 kV/m 以上,地面电场值极大。而当负电荷中心升高至1 000 m 时,地面电场 值减小了很多,一般在-100 kV/m 左右,最大值接近-180 kV/m,但地面电场仍然比较大。

82		气	象	科	学	27 卷
(2	2)云内电量为 25 C,负电荷中心	。高度为	l 000 n	n 时,雷	暴云下,	地面电场值很大,例如当正电荷中心在3

500 m 时,地面电场已达-400 kV/m 以上;如果负电荷上升至1500 m 高度时,地面电场值在-80 kV/m~ -200 kV/m 之间。

(3)云内电量在 40 C 以上,负电荷区高度在 2 000 m 以下时,地面电场值多数在-300 kV/m 以上。 综上所述,雷暴云内正负电荷中心高度较低,即负电荷高度在 2 000 m 以下时,地面电场为强电场,但受 空间屏蔽层的影响,实际地面电场会减小,地面电场被抑制在一定范围内[6]。

		Iat	ble i in	e strong e	lectric fiel	a on the g	grouna un	derneath t	nundersto	orm .		
<b>Q</b> (C)	H <sub>P</sub> (m) H <sub>N</sub> (m)	1 000	1 500	2 000	2 500	3 000	3 500	4 000	4 500	5 000	5 500	6 000
5C	500	-269, 75	— 319, 71	-337.19	-345.29	-349, 68	-352,33	-354.05	-355,23	-356,08	-356,7	-357,17
	1 000	-	49. 95	-67.44	- 75. 53	—79. 93	-82, 58	-84.30	-85.48	-86.32	- 86.95	-87.42
10C	500	-539, 51	-639.42	—674.39	-690.57	-699.36	-704.66	-708.1		<b>—712.</b> 15	-713, 4	—714, 35
	1 000	-	99, 91		-151 <i>.</i> 06		-165.16	—168, 6	-170.96	-172. 64	- 173, 89	-174.84
25C	1 000	_	-249, 77	—33 <b>7.</b> 19	-377.66	-399.64	-412, 89	-421.49	-427. 39	-431.61	-434,73	-437 <b>.</b> 1
	1 500	_	_	-87.42	-127.88	-149,86	- 163.12	-171.72	-177,62	-181.83		-187.33
40C	1 000	_	-399.64	- 539, 51	-604.25	-639.42	-660,62	-674.39	-683.82	-690.57	-695.56	-699.36
	1 500	-	_	— 139. 87	-204 <b>.</b> 61	-239.78	-260, 99	-274.75	-284.19	-290, 93	- 295, 93	-299,73
50C	1 500	_	_	174. 84	-255, 77	-299.73	-326, 23		- 355, 23	—363, 67	369. 91	374. 66
	2 000	-	-	_	-80, 93	-124 <b>.</b> 89	151, 39	168, 6	-180, 39	-188,83	-195,07	-199.82

表1 窗暴云下强地面电场



图 2 闪电与雷暴云结构 (a)高空风小以云闪为主 (b)高空风大以地闪为主 Fig. 2 Lightning and structure of thunderstorm

### 2.2 有高空风切变时雷暴云下地面电场

如果把大地看成是一平面导体,偶极性雷暴云内正负电荷在其下方的地面将分别感应出负正电荷,地面 电场是由云内电荷和地面感应电荷共同激发的。利用偶极子模式计算得出图 2a 中地面电场的总效果为负 的地面电场;图 2b 中雷暴云母体下地面为负电场,云砧下为正地面电场。当云内电场达到一定强度时将发 生云闪,如图 2a 所示。在图 2b 中,受高空风的影响,正电荷区相对于负电荷区发生偏移,集中分布在云砧 处,此时雷暴云母体下感应电荷以正电荷为主,而云砧下地面感应电荷以负电荷为主,此时雷暴云母体下方 地面为负电场,而在云砧下方地面为正电场,受地面电场的影响,在雷暴云母体下方以负地闪为主,而正地闪 常出现在卷云砧下方。

#### 2.2.1 雷暴云砧下地面电场

当高空风很大时,风速的垂直切变很大,积雨云呈椭圆型云团,长轴方向与风的垂直切变方向一致,云团 到成熟时,下风一侧出现卷云砧<sup>[7,8]</sup>,整个云体发生倾斜,雷暴云上部的正电荷区将偏离原来的位置,云内正

#### 罗 霞等:雷暴云电结构与闪电关系初探





负电荷结构倾斜,如图 2b 所示,从而造成地面电场发生变化。

以云砧中正电荷中心在地面的投影点为坐标原点,由式1计算出云砧出现前后的地面电场值,如图图3 所示,分析了雷暴云母体下方地面电场与云砧下地面电场的变化。假定正电荷中心偏移1000 m,将图中云 砧下地面电场(虚线曲线)与未出现云砧时雷暴云下地面电场(实线曲线)进行比较发现,整体上地面电场变 化不是很明显,且图中曲线1与曲线8基本重合,但在雷暴云母体和云砧下方地面电场变化比较突出。如曲 线7,出现云砧后雷暴云母体下方地面电场值由曲线14中的约-120 kV/m 增大到约-126 kV/m。曲线6 中雷暴云母体下地面电场由曲线13中约-71 kV/m 增大到-73 kV/m。并且云砧出现前后云砧下地面电 场也发生了改变,例如曲线7,云砧下地面电场由约-58 kV/m(图3中曲线14上b点)减小到-52 kV/m (图3中曲线7上a点)。其他曲线中电场也有所改变,但与曲线6和曲线7相比变化不明显。由于正电荷 集中分布在云砧,地面感应负电荷,利用偶极子模型可知地面电场为正电场,如图3中曲线7,在约2000 m 处,地面电场由曲线14 的约-2 kV/m 的负电场值转变为+9 kV/m 的正电场,可能引发正地闪。

综上所述,受高空风影响,正电荷集中分布在云砧处,雷暴云电结构改变,雷暴云母体下地面负电场和云 砧下地面正电场均有所增大,即正电荷分布在云砧时,既有利于负电荷中心下方发生负地闪,也有利于云砧 下出现正地闪。

#### 2.2.2 雷暴云负电荷放电后地面电场值

由于负电荷荷电中心高度低,电荷离地面越近,产生的地面电场越大,越容易发生地闪,所以一般先发生 负地闪。若雷暴云中电场及地面电场达到一定强度发生负地闪后,在短时间内由于负地闪放电的影响,云中 负电荷值减小,而正电荷值保持不变。假设雷暴云正电荷中心在 5 000 m 高度处,负电荷中心在 2 000 m 处,正负电荷中心水平距离差为 x<sub>0</sub>,利用式 1 计算了负地闪发生后地面电场值,如表 2 所示。

从表 2 中可以看出,受云内负电荷减少和正电荷区偏移的影响,雷暴云下方的地面电场发生明显的改 变。如云内正电荷为 15 C 时,不论负电荷消耗多少,正电荷区偏移多少,地面正电场值都较小。若云内正电 荷电量为 40 C 时,负电荷电量在 5 C 及以下时,云砧下地面电场均为正值,而当负电荷消耗不是很多,还余 有 25 C 时,此时雷暴云母体下方地面电场值约为-84 kV/m,发生负地闪的可能性较大,随着正电荷不断偏 移,地面电场变为正电场,出现正地闪的可能性增大。负地闪发生后,地面电场有以下几个特点:

(1) 雷暴云内电量较小,负地闪放电消耗了部分负电荷后,卷云砧下地面正电场值不是很大,产生正地闪 的可能性较小。 气象科学

27卷

表 2 负地闪后雷暴云下地面电场(单位:kV/m)

Q <sub>N</sub> (C)	0.0	5 C	10 C	15 C	20 C	25 C
<b>X</b> <sub>0</sub> (m)						20.0
			$\mathbf{QP} = 10 \ \mathrm{C}$			
0	7.19	-15.29	-37.77	_	_	_
5 000	7.19	6.04	4.89	_	_	-
			QP = 15 C			
0	10.79	-11.69	-34.17	-56.65	_	. –
1 600	10.79	0.09	-10.62	-21.32	—	-
2 800	10.79	5.69	0.60	-4.50	—	
5 000	10.79	9.64	8.49	7.34	_	_
			QP = 40 C			
0	28.77	6.29	-16.19	-38.66	-61.14	-83.62
1 200	28.77	14.60	0.43	-13.75	-27.92	-42.09
1 800	28.77	19.54	10.31	1.08	-8.15	-17.38
2 200	28.77	21.93	15.09	8.25	1.40	-5.44
2 600	28.77	23.68	18.58	13.49	8.39	3.30
5 000	28.77	27.62	26.47	25.32	24.17	23.02
			QP = 80 C			
0	57.55	35.07	12.59	-9.89	-32.37	- 54.85
800	57.55	39.55	21.56	3.57	-14.42	-32.42
1 200	57.55	43.37	29.20	15.03	0.85	-13.32
1 600	57.55	46.84	36.14	25.44	14.73	4.03
5 000	57.55	56.40	55.24	54.09	52,94	51, 79

Table 2 The electric field on the ground underneath thunderstorm after the negative lightning flash

(2)随着雷暴云起电量增大,云内负电荷减少,正电荷不断偏移,云砧下产生了较大的地面正电场,因而 易产生正地闪。

## 3 卫星云图、雷达回波与正负地闪关系

2003 年 5 月 4 日甘肃省和政观测站和兰州市的平安乡均出现了降雹天气,该次天气过程中的闪电数据 来源于设在中川的 B 型 M-LDARS 单站闪电定位仪,雷达数据来源于设在兰州 CINRAD/CC(3830)多普勒 雷达和 713 雷达探测。

图 4 中.a、b、c 三图分别是 2003 年 5 月 4 日下午 17:30、18:30、19:00 的红外云图,显示的是我国西北地 区的云系分布,可以看出 A-B 上风边界清楚,下风一侧有较短的卷云羽。图 5 是 2003 年 5 月 4 日正负地闪和 雷达回波分布图。图中雷达回波是等高平面位置显示(CAPPI)图,并将雷达资料由极坐标转换成了直角坐标, 同时将雷达资料和闪电资料投影在地图上,进而可分析雷达回波与闪电发生位置的关系。冰雹云中的冰雹形 成区,含有大量的过冷却水滴,雷达回波特别强,由雷达体扫资料得到该次天气过程中回波顶高一般在 10 km 以上,回波超过 30 dBz 的区域很大,是一次较强的对流过程。从图 5 可知闪电基本分布在雷达回波区内,但密 集区并不与最强的回波区对应,其中最西的一个闪电密集区无回波,是因为超出雷达探测范围。雷达回波有两 块,其表现为西北一东南走向,与图4的卫星云图上云系走向基本一致。在积石与永登之间有一块回波最大强 度在 30 dBz 左右,在它的东南方广河县有一块较强的回波,最大强度达 50 dBz 左右,在这两块回波较强处基本 为负地闪,正地闪主要出现在南面一块回波的东侧。结合图4中的云图分析,负地闪出现在西南边的上风边界 处,而正地闪则与卷云羽的位置一致,即处于云团的下风一侧,即由于雷暴云内电荷结构发生倾斜,在雷暴云的 母体附近主要以负地闪为主,而在雷暴云下风侧为正地闪。从图5中可得闪电位置与雷达回波区分布有以下 两个特点:一是闪电密集区基本与大于 10 dBz 雷达回波区一一对应。二是闪电先于 10 dBz 的雷达回波区出 现,且闪电密集区最大中心不是雷达回波最大区,而是稍偏于雷达回波大于 10 dBz 移动方向的左侧。图 4、图 5 说明地闪分布位置、雷达回波位置以及卫星云图上雷暴云的位置三者基本上吻合,而且正地闪多分布在卷云砧 处,因而可将卫星云图资料与雷达回波资料综合分析,可大致判断出地闪发生的位置<sup>[9]</sup>。



图 4 2003 年 5 月 4 日不同时间红外云图 (a)17:30 (b)18:30 (c)19:30 Fig. 4 The infrared cloud chart at different time on May 4,2003



图 5 2003 年 5 月 4 日闪电和雷达回波(+ 正地闪,一 负地闪) Fig. 5 The lightning and the radar echo on May 4,2003(The symbols "+" denote the positive cloud-to-ground lightnig. The symbols "-" denote the negative cloud-to-ground lightning)

## 4 结 论

利用雷暴云偶极性电荷分布模型,计算了不同荷电结构下的地面电场,结合卫星和雷达资料进行分析, 得到以下几点结论:

(1)地面电场分布受雷暴云内正/负电荷区分布高度的影响,其中负电荷区的高度对地面电场影响较为 重要,同时地面电场与云内电量成正比关系。

(2)由于高空风切变的影响,雷暴云电结构倾斜,正电荷区偏移,正电荷集中分布在云砧,雷暴云母体和 云砧下方地面负和正电场均有所增大,均有利于负地闪和正地闪的发生。

(3)负地闪放电后,短时间内云内负电荷减少,正电荷电量不变,雷暴云下方地面负电场减小。随着正电荷区水平位移增大,负电荷消耗量增大,地面电场逐渐变为正值且不断增大,有利于正地闪发生。

(4)正地闪多出现在云砧下方,而负地闪集中在雷暴云母体下方,因而可利用卫星雷达资料初步判断正/负地闪发生位置。

285

#### 参考文献

[1] Sadiku M N O. Elements of Electromagnetics, Orlando; Saunders College, 1994, 18-20.

[2] 程向阳,王兴荣,胡雯,等. 雷暴天气在多普勒雷达资料上的前兆特征分析. 气象科学,2003,23(4):485-490.

- [3] Hondl K D, Eilts M D. Doppler radar signatures of developing thunderstorms and their potrntial to indicate the onset of cloud-toground lightning. Mon. Wea. Rev., 1994, 122; 1818-1836.
- [4] 杨国锋,汤达章,刘晓,等.一次强风暴天气闪电定位资料与雷达资料的综合分析.气象科技,2005,33(2):167-172.
- [5] 陈渭民. 雷电学原理. 北京: 气象出版社, 2001: 95-100, 207-217.
- [6] Donald R, Macgorman W, David Rust. The Electrical Nature of Storms. New York: Oxford University Press, 1998, 76-82.
- [7] 陶诗言,丁一汇.卫星云图在天气分析和预报中的应用.北京:科学出版社,1972:1-22.
- [8] 陈渭民.卫星气象学.北京:气象出版社,2003:214-223.
- [9] 李霞,肖稳安,朱贵刚.高层建筑分体式空调室外机的雷电防护.南京气象学院学报,2005,28(2):219-224.

## ANALYSIS OF THE RELATIONSHIP BETWEEN CHARGE STRUCTURES AND LIGHTNING IN THUNDERSTORM

#### Luo Xia<sup>1</sup> Chen Weimin<sup>1</sup> Li Zhaorong<sup>2</sup> Hu Shengjuan<sup>3</sup> Li xu<sup>3</sup>

(1 Jiangsu Key Laboratory of Meteorological Disaster, NUIST, Nanjing 210044)

(2Gansu Weather Modification Office, Lanzhou 730020) (3 Jiangsu Province Meteological Office, Nanjing 210008)

**Abstract** Based on the positive dipole structure of thunderstorm, combining with satellite data and radar data, this paper analyses the electric fields on the ground aroused by different electricity structures of thunderstorm. Results show that the higher center position of the positive charge and the lower ones of the negative charge will lead to stronger induced negative electric field, all of these will make the occurrence of cloud-to-ground lightning easier. When the cloud-to-ground lightning happens, the negative cloud-to-ground lightning takes place first and consumes some negative charges, then the positive ones will distribute in the plume, which will easily cause the occurrence of the positive cloud-to-ground lightning. Through analyzing radar data and satellite image the cloud-to-ground lightning location can be seen.

Key words Charge structure of thunderstorm Ground electric field Radar echo Satellite image Cloud-to-ground lightning