

# 低纬高原大气电场特征及其在预警中的应用<sup>\*</sup>

谢屹然<sup>1</sup>, 徐 开<sup>2</sup>, 张腾飞<sup>1</sup>, 刘雪涛<sup>1</sup>

(1. 云南省气象台, 云南 昆明 650034; 2. 云南省气象科学研究所, 云南 昆明 650034)

**摘 要:**通过对 2006 年 7 月–2007 年 6 月云南地闪定位网探测资料和玉溪大气电场仪资料分析, 研究了高原晴天大气电场和雷暴天气过程的电场演变特征。结果表明: 高原晴天大气电场具有明显的日变化和月变化特征。低纬高原地区雷暴云具有偶极性和三极性两种结构, 但大多数雷暴具有偶极性电荷结构, 不同电荷结构的雷暴云的放电特征不同, 偶极性时主要为负地闪, 地闪活动较活跃; 三极性时主要是正地闪, 地闪活动较少。根据雷暴云近地面电场变化特征, 探讨了大气电场仪预警地闪的方法, 首次提出极性变化预警法, 其命中率和提前预警时间都明显优于阈值预警法。

**关键词:** 大气电场仪; 地闪预警; 极性反转; 低纬高原; 云南省

**中图分类号:** P427.3   **文献标志码:** A   **文章编号:** 1000–811X(2012)03–0034–05

闪电作为一种具有大电流、高电压、强电磁辐射的自然现象, 已成为目前最严重的自然灾害之一, 其破坏力和造成的人员伤亡、财产损失是巨大的。在我国, 据马明等统计<sup>[1]</sup>, 1997 年至 2006 年, 雷灾造成了 4 488 人死亡, 4 320 人受伤, 估计我国每年每 100 万人中大约有 0.53 人死于雷击, 高于美国、英国。而云南由于地处低纬高原, 地形地貌复杂, 是亚洲两大季风系统的交汇处, 强对流天气和闪电活动频繁, 雷灾频发。据不完全统计, 2007 年仅 5–8 月, 云南共发生雷电灾害事故 136 起, 造成 58 人死亡和 58 人受伤<sup>[2]</sup>。

雷暴云电荷结构一直是大气电学研究的重点。常规的雷暴云一般都具有偶极性电荷结构特征, 即在雷暴云的上部为主正电荷区, 中部为主负电荷区, 在雷暴云的下部是一个尺度和电荷量都较小的正电荷区<sup>[3–4]</sup>。从 2002 年至 2006 年, 郅秀书等<sup>[5]</sup>利用 GPS 同步的多站闪电快、慢电场变化和平均电场的同步观测, 配合 1 ms 的高速摄像对我国 4 个不同高原地区的雷暴地面电场特征的观测研究发现, 高原地区雷暴电荷结构与平原地区雷暴电荷结构只存在一种偶极性结构不同<sup>[6]</sup>, 在高原地区存在两种不同电荷结构的雷暴云, 一种是正常的偶极性结构, 另一种是三极性结构, 和以上文献所说三极性不同的是雷暴云的下部存在大范围的正电荷区, 被称作 LPCC<sup>[7]</sup>。

由于地闪对地面的危害, 对地闪的预警一直是雷电预警的重要研究方向。对于地闪的预警, 国内外主要是利用多普勒雷达资料, 研究雷暴云

的各种物理属性和参数对地闪进行预警。Hondl 和 Eilts<sup>[8]</sup>发现在冻结层附近首先探测到 10 dBz 回波可能是雷暴的初生特征, 但预报员实际气象保障预警业务中发现这个指标并不可靠, 最后选用了云顶高度参数作为预报因子<sup>[9]</sup>; Gremillion 和 Orville<sup>[10]</sup>分析了经过美国肯尼迪航天中心的 39 个雷暴, 结果表明当云地闪将要发生时, 雷达反射率和预报对象之间存在一个相关关系, 对于夏季雷暴, 最好的预警指标是在 –10 °C 层高度、在两个连续的体扫描上都能达到 40 dBz 的阈值。王飞等<sup>[11]</sup>利用多普勒雷达资料, 结合探空、闪电资料对 2005 年夏季北京地区的 20 个单体过程进行综合分析发现: 40 dBz 是比较适合该地区雷电预警的一个雷达回波特征参量。但对于利用电场仪对周围大气电场环境实时测量来预警地闪的方法研究相对较少, 可较小范围内(例如公园、娱乐场等)的地闪预警大气电场仪实用性和有效性更强。过去大气电场仪预警地闪一般通过设定最佳阈值, 但阈值取决于雷暴云所带的电荷量和雷暴云距离测站的远近, 各地预警效果相差较大。取 1 kV/m 阈值, 在美国佛罗里达地区的预警命中率(POD)只能达到 34.4%<sup>[12]</sup>, 而在其它地区可以达到更高的命中率<sup>[13]</sup>。本研究利用 2006 年 7 月–2007 年 6 月云南地闪定位网探测资料和玉溪大气电场仪资料, 分析了玉溪晴天大气电场和雷暴天气过程的地面电场演变特征, 得到该地区可能的雷暴云电荷结构, 结合简单雷暴云电荷结构模式, 首次提出一种新的基于大气电场的地闪预警方法——地

<sup>\*</sup> 收稿日期: 2011–12–15    修回日期: 2012–01–29

基金项目: 云南省气象局 2010 年预报员专项(YB201002); 云南省科技攻关项目(2009CA014); 云南省气象局业务能力建设专项重点项目(YZ200901)

作者简介: 谢屹然(1978–), 男, 白族, 云南剑川人, 硕士, 工程师, 主要从事大气电学和灾害性天气监测和预警工作。

E-mail: dlxieyr@gmail.com

面电场极性变化预警法, 并对它与基于大气电场的阈值预警法的预警效果进行了比较。

## 1 资料和方法

本文所用的地闪资料由云南省地闪定位监测系统提供。云南省地闪定位监测系统由 23 个探测仪和一个数据处理中心站组成, 23 个探测仪自北向南依次为: 昭通、香格里拉、丽江、东川、泸水、大理、元谋、曲靖、昆明、施甸、双柏、泸西、通海、广南、瑞丽、元江、景谷、耿马、文山、金平、江城、孟连、勐腊。每个闪电定位仪探测范围为 300 km, 云南省 23 个点组成的地闪定位监测系统能够实现在全省绝大部分地区(除滇西北迪庆北部山区)的探测。整个闪电监测系统由中国科学院空间中心研制和布设, 系统定位利用多站时差综合定位法。每个单站都将测到的闪电发生时间、方位、强度和电磁辐射信号实时传输给中心站, 进行实时定位处理。系统提供的每个信息包括回击发生的时间、位置(经纬度)、强度、极性等。该闪电探测网的探测精度和探测效率分别为 400m 和 90% ~ 95%。

大气电场仪安装在低纬高原中部的玉溪(102°33'E, 24°21'N), 海拔 1 636.7 m。大气电场仪测量范围为方圆 15 km, 高度 1.3 m, 精度为 10 V/m, 响应时间为 1s。在研究中以大气电场仪为中心, 半径为 15 km 的范围为警戒区。在讨论地面电场变化之前作如下约定: 当地面电场受雷暴云内正电荷控制时, 地面电场为正; 一次闪电中和了负电荷, 则对应地面电场正向变化; 反之亦然。利用 TS 评分方法比较了两种预警方法的预警效果, 具体为在警戒区内发生第一个地闪, 事先预警准确定义为有效预警(EA); 在警戒区内发生地闪, 事先没有预警定义为预警错误(FTW); 而在警戒区内没有地闪发生, 事先预警有地闪发生, 定义为虚警(FA)。则命中率 POD 和虚警率(FAR)的计算方法如下:

$$POD = \frac{EA}{EA + FTW}, \quad (1)$$

$$FAR = \frac{FA}{FA + EA}. \quad (2)$$

## 2 晴天大气电场特征

晴天大气电场代表的是一个参考状态, 而雷暴的发生实际上是相对于这一正常状态的偏离, 因此对晴天大气电场特征进行研究, 对于更有效地预警雷暴天气是十分必要的。通过 2006 年 7 月 - 2007 年 6 月玉溪大气电场仪监测资料的分析发现, 在这一年中有 225 天为晴天或大气电场没受到

外界和雷暴云电场的影响; 玉溪晴天大气电场的平均值为 700 V/m, 晴天大气电场有明显的日变化和月变化特征。从图 1a 可以看出, 玉溪晴天大气电场日变化呈双峰双谷型, 04 - 06 时和 13 - 15 时出现极小值, 08 - 10 时和 20 - 21 时出现极大值。这个日变化的振幅可达平均值的 25%。同时晴天大气电场还存在月变化, 一年中晴天大气电场最小值为 480 V/m, 出现在 1 月, 而最大值为 816 V/m, 出现在 8 月(图 1b)。这与 8 月玉溪雷暴活动较频繁, 而 1 月基本上没有雷暴活动有关, 因为晴天大气电场起源于雷暴<sup>[14]</sup>。

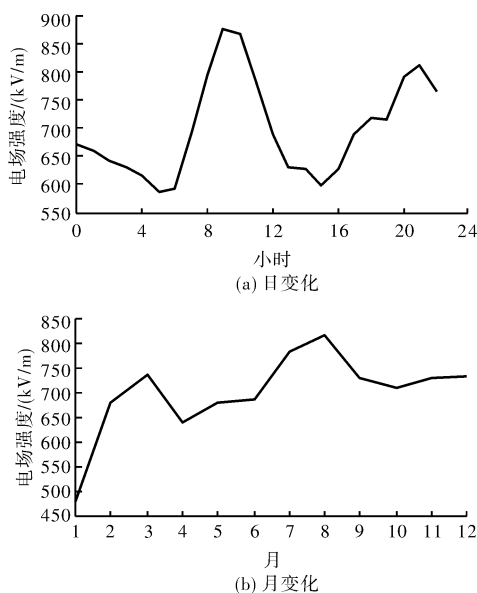


图 1 玉溪晴天大气电场的日变化和月变化

## 3 雷暴云的大气电场特征

### 3.1 简单雷暴云电荷结构模式

国外多年的研究表明<sup>[15]</sup>, 雷暴云的主电荷分布可用一正偶极子模式来描述: 上部一正电荷  $Q_p$ , 下部一负电荷  $Q_n$ , 在云底附近有时会存在局部的正电荷。云底局部正电荷区的空间尺度很小, 存在的时间也很短。如果认为地面为水平的理想导体平面, 且在不考虑地面电晕放电的情况下, 通过简单计算, 即可求出简单模式电结构的雷暴云在地面各点产生的电场。图 2 是假设雷暴云电荷结构为偶极性(虚线)和三极性(实线)情况下地面的电场分布图。计算中正、负电荷电量均取 40 C, 离地面的距离分别是 12 km 和 7 km。由虚线可以看出, 正偶极子模式电结构的雷暴较近时, 地面电场为负值; 雷暴较远时, 地面电场为正值; 存在一反号距离, 该处地面电场等于零。图 2 中实线为上述正偶极子的原参数保持不变, 而在负电荷下部再加一正电荷 3 C(离地面为 2 km)时得到的结果, 即为具有三极性结构电荷模式的雷暴云在

地面产生的电场。如果具有上述电荷分布模式且电荷基本稳定的雷暴云以一定速度经过某一观测站,则该站测得的地面电场随时间的变化曲线与上述电场随距离的变化曲线相类似(图3)。

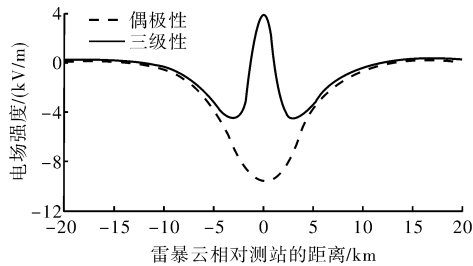


图2 雷暴云偶极性和三极性电荷模式在地面的电场强度分布

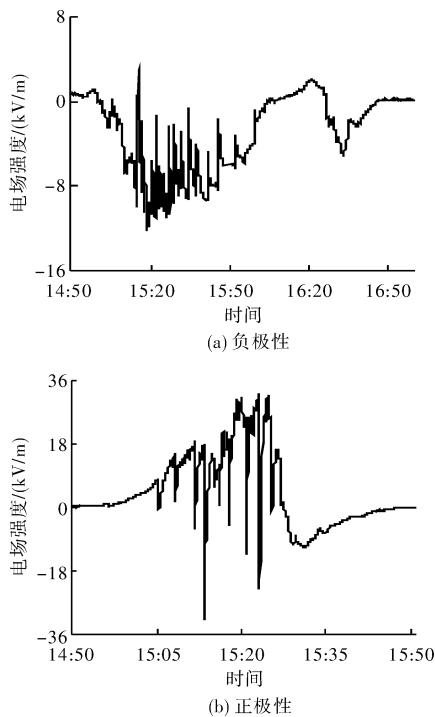


图3 雷暴过程地面电场波形随时间的演变

### 3.2 雷暴电荷结构

在2006年7月-2007年6月这一年中,一共观测到33次过顶雷暴的过程,从地面电场记录来看,尽管雷暴过程时常表现出比较复杂的地面电场波形,但总体可分为两类波形,一类是雷暴过境地面电场主要为负极性,另一类主要为正极性。图3所示的是这两种典型波形。其中图3a是负极性,图3b是正极性。对33次过境雷暴电场波形的统计表明,正极性波形占1/4,负极性波形占3/4,负极性出现比例较高。图3a是2006年8月8日一次雷暴过境时的地面电场记录。根据观测站实况记录,15:00雷暴向测站方向移动,地面开始变为负值,15:20雷暴云经过测站上空,地面平均电场达到-12 kV/m;16:10电场变为正值,雷暴远离测站,整个雷暴过程约持续70 min。从图可

见,雷暴过境时地面电场均为负极性电场,即雷暴中负极性电荷起主导作用。整个过程的地面电场演变和图2中偶极性电荷结构的曲线是一致的,该雷暴云具有偶极性电荷结构。图3b所示为2007年2月8日一次雷暴过境时的地面电场记录。根据观测站实况记录,约15:00看到雷暴向观测站方向移动,地面电场为正;随后电场迅速增强,表明雷暴中心已到达观测站上空;15:30中心开始移出观测站,且逐渐远去。15:50时基本消散,整个雷暴过程约持续50 min。从图可见,雷暴过境时地面电场均为正极性电场,即雷暴中正极性电荷起主导作用。平均地面电场强度最大可达32 kV/m。整个过程的地面电场演变和图2中三极性电荷结构的曲线是一致的,该雷暴云具有三极性电荷结构。但从统计结果来看,所占比例相对较少。因此,玉溪为代表的低纬高原地区雷暴云具有偶极性和三极性两种结构,但大多数雷暴具有偶极性电荷结构。

### 3.3 不同电荷结构雷暴云的放电特征

不同电荷结构的雷暴云的放电属性和强度有显著差别,可以在地闪预警中区别对待。具有偶极性结构的雷暴云,成熟雷暴云过顶时地面电场极性为负,而具有三极性结构的雷暴云,成熟雷暴云过顶时地面电场极性为正。表1中给出不同极性控制下的雷暴放电特征,从表中可以看出,当地面电场极性为正极性时,每次过程平均有9.2次地闪回击,正地闪回击有5次,占54%,雷暴过程放电主要以正地闪为主,平均峰值电流强度达到42.1 kA。当地面为负极性时,每次过程平均有58.7次地闪回击,而正地闪平均仅有1.4次,有些过程全部为负地闪,没有正地闪,总地闪活动较为活跃,平均峰值电流强度相对较小,只有29.9 kA。

图4所示为2007年4月8日一次雷暴过境时的地面电场和对应闪电频数随时间的演变。从图4a可以看出,随着雷暴往测站移动,地面电场极性变为正,整个雷暴过程所有放电都为正地闪。图4c和图4d是2006年7月15日一次雷暴过境时的地面电场和对应闪电频数随时间的演变。和上一个过程相反,整个雷暴过程,地面电场极性都为负,地闪活动比较活跃,地闪频数最大达到19次/5 min,一共146个地闪,正地闪只有2个,整个过程放电以负地闪为主。

表1 不同电场极性控制下的闪电放电特征

过程数	雷暴过顶时的近地面电场极性	正地闪/次	负地闪/次	总地闪/次	平均地闪强度/kA
6	正	5	4.2	9.2	42.1
18	负	1.4	57.3	58.7	29.9

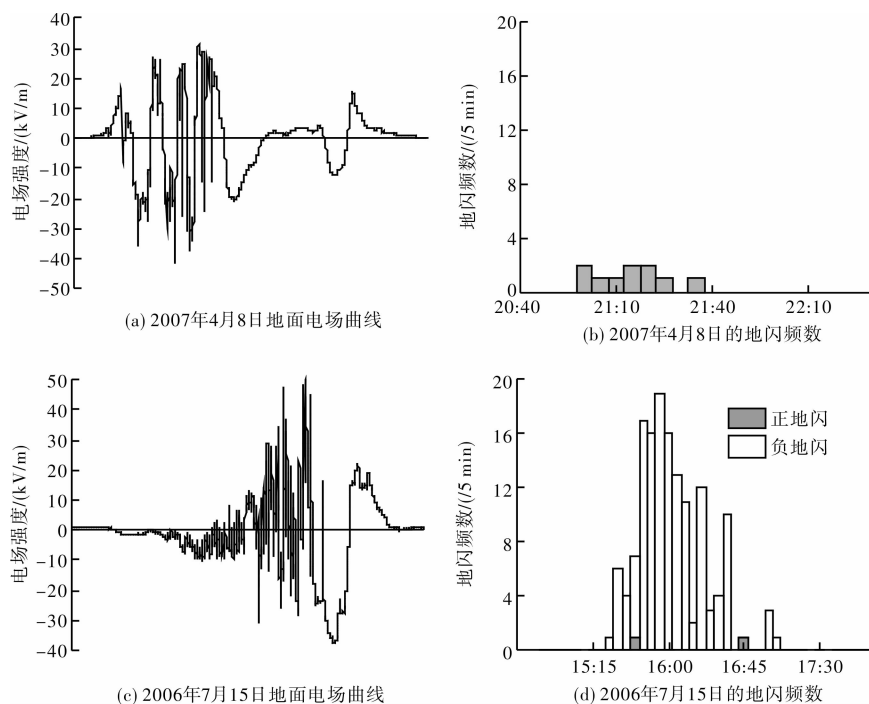


图4 不同电场极性控制下的闪电放电特征对比

## 4 不同地闪预警方法的预警效果

通过对以上雷暴云在地面电场随时间的变化曲线分析可以看出, 无论是雷暴云电荷结构呈偶极性还是三极性, 当雷暴向警戒区靠近时, 地面电场变为负, 将可能有闪电发生。地面电场极性变化可以作为地闪预警的一种新指标, 对警戒区内可能发生的地闪进行预警。

### 4.1 地面电场阈值预警法

利用大气电场仪进行地闪预警, 通常采用选定一个最佳阈值进行预警。通过玉溪大气电场仪的晴天大气电场值计算得到玉溪晴天大气电场平均值为  $700 \text{ V/m}$ , 考虑到大气电场的日变化, 选择了  $2 \text{ kV/m}$ 、 $3 \text{ kV/m}$ 、 $5 \text{ kV/m}$ 、 $7 \text{ kV/m}$ 、 $9 \text{ kV/m}$  作为阈值进行地闪预警, 并对预警效果进行评分, TS 评分结果如表 2 所示。

表2 各种地面电场阈值和极性变化预警效果对比

评分	指标					地面电场 极性变化
	$2 \text{ kV/m}$	$3 \text{ kV/m}$	$5 \text{ kV/m}$	$7 \text{ kV/m}$	$9 \text{ kV/m}$	
FAR	5%	8%	11%	0	0	7%
POD	55%	41%	28%	21%	11%	81%
LT	11	10	9	11	10	12

从表 2 中可以看出, 随着地面电场阈值的变大, 命中率降低, 而提前预警时间 (LT) 基本上平均为  $10 \text{ min}$ 。对比分析看, 采用阈值法对地闪进行预警, 地面电场阈值取  $2 \text{ kV/m}$  预警效果较好。

### 4.2 地面电场极性变化预警法

地面电场极性变化预警具体操作是当地面电场值变为负时, 预警警戒区内将可能有地闪发生。通过对同样 30 个雷暴过程的分析, 得到 FAR 为 7%, POD 为 81%,  $T_s$  评分为 0.76, 提前预警时间为  $12 \text{ min}$ , 见表 2。

图 4c 所示为 2006 年 7 月 15 日一次雷暴过境时的地面电场记录, 图 4d 所示为该雷暴过程每 5 min 的闪电频数变化。其中地闪是统计了此次雷暴过程中电场仪方圆  $15 \text{ km}$  之内云南省地闪定位网监测到的地闪。根据实况记录, 14:57 地面电场变为负值, 而 15:21 出现了第一次地闪, 通过电场极性变化可以提前  $24 \text{ min}$  对警戒区进行预警。通过电场阈值进行预警, 设  $2 \text{ kV/m}$  的阈值, 15:23 地面电场才达到  $-2.02 \text{ kV/m}$ , 显然出现了漏报。

## 5 结论和讨论

利用 2006 年 7 月 - 2007 年 6 月云南地闪定位网探测资料和玉溪大气电场仪资料, 对低纬高原地区的大气电场演变特征进行了研究, 提出一种利用大气电场仪进行地闪预警的新方法, 主要结论如下。

(1) 低纬高原中部晴天大气电场具有明显的日变化和月变化特征。低纬高原中部晴天大气电场呈双峰双谷型, 04 - 06 时和 13 - 15 时出现极小值 08 - 10 时和 20 - 21 时出现极大值。这与青藏高原中部羊八井地区晴天大气电场日变化呈双峰双谷

型相同<sup>[16]</sup>。晴天大气电场还存在月变化,一年中晴天大气电场强度1月较弱,而8月最强。这与青藏高原中部羊八井地区冬季晴天大气电场强度最强,而春夏季较弱不同<sup>[16]</sup>。

(2)低纬高原雷暴云具有偶极性和三极性两种结构,但大多数雷暴具有偶极性电荷结构。这与青藏高原地区雷暴云主要呈三极性结构<sup>[17]</sup>和我国华南地区雷暴云主要呈偶极性结构不同<sup>[6]</sup>。

(3)不同极性电场控制下的雷暴放电特征有明显的差异。具有偶极性结构的雷暴云过顶时地面电场极性为负,地闪活动活跃,而具有三极性结构的雷暴云过顶时地面电场极性为正,地闪活动较弱,这可能是雷暴云低下的正电荷层一般不产生正地闪,而是与负电荷层产生反极性的放电有关<sup>[7]</sup>。

(4)极性变化地闪预警方法在命中率、虚警率和提前预警时间上都明显优于阈值预警法,而且设置也相对简单,值得在以后的雷电预警业务运行中推广使用。

## 参考文献:

- [1] Ma Ming, Lu Weitao, Zhang Yijun, et al. Study on the characteristics of lightning exposure in China from 1997 to 2006 [J]. *Acta Meteorological Sinica*, 2008(19): 393–400.
- [2] 张腾飞,尹丽云,许迎杰,等. 2007年5–8月云南省雷电路活动特点和致灾因子分析[J]. *灾害学*, 2009, 24(1): 73–79.
- [3] Williams E R. The tripole structure of thunderstorms [J]. *J. Geophys. Res.*, 1989, 94: 13151–13167.
- [4] Marshall T, Rust W. Electric field soundings through thunderstorms [J]. *J. Geophys. Res.*, 1991, 96: 22297–22306.
- [5] Qie X, Zhang T, Zhang G, et al. Electrical characteristics of thunderstorm in different plateau regions of China [J]. *Atm. Res.*, 2009, 91(2/4): 244–249.
- [6] 张翠华,张义军,张广庶,等. 地闪连续电流特征的统计分析[J]. *高原气象*, 2000, 19(3): 371–378.
- [7] Qie X, T Zhang, C Chen, et al. The lower positive charge center and its effect on lightning discharges on the Tibetan Plateau [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 2005, 32, L05814, doi: 10.1029/2004GL022162.
- [8] Hondl K D, M D Eilts. Doppler radar signatures of developing thunderstorms and their potential to indicate the onset of cloud-to-ground lightning [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 1994, 122: 1818–1836.
- [9] Johnson J T, M D Eilts, D Ruth, et al. Warning operations in support of the 1996 Centennial Olympic Games [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 2000, 81: 543–554.
- [10] Gremillion M S, R E Orville. Thunderstorm characteristics of cloud-to-ground lightning at the Kennedy Space Center, Florida: a study of lightning initiation signatures as indicated by the WSR-88D [J]. *Wea. and Forecasting*, 1998, 14: 640–649.
- [11] 王飞,张义军,赵均壮,等. 雷达资料在孤立单体雷电预警中的初步应用[J]. *应用气象学报*, 2008, 4(19): 153–160.
- [12] Murphy M J, Holle R L, Nicholas W S, Demetriades. Cloud-to-ground lightning warnings using electric field mill and lightning observations [C]// *International Lightning Detection Conference*. Tucson, AZ, 2008.
- [13] Brook M, Nakano M, Krehbiel P, et al. The electrical structure of the Hokuriku winter thunderstorms [J]. *J. Geophys. Res.*, 1982, 87: 1207–1215.
- [14] Wilson C T R. The maintenance of the earth's charge [J]. *Observatory* 45, 1922, 393; 484.
- [15] Rakov V A, Uman M A. *Lightning: Physics and effects* [D]. Cambridge University Press, 2003.
- [16] 徐斌,张颖,贾焕玉,等. 西藏羊八井地区近地晴天大气电场周期变化[J]. *高原气象*, 2009, 28(2): 314–318.
- [17] Zhang Yijun, Dong Wansheng, Zhao Yang, et al. Study of charge structure and radiation characteristic of intracloud discharge in thunderstorms of Qinghai-Tibet [J]. *Science in China (D)*, 2004, 47: 108–114.

# Electrical Characteristics of Atmosphere in the Lower Latitude Plateau and Its Application in Lightning Warning

Xie Yiran<sup>1</sup>, Xu Kai<sup>2</sup>, Zhang Tengfei<sup>1</sup> and Liu Xuetao<sup>1</sup>

(1. *Meteorological Observatory of Yunnan Province, Kunming 650034, China*; 2. *Meteorological Science Institute of Yunnan Province, Kunming 650034, China*)

**Abstract:** The characteristics of atmospheric electric field in fair weather and thunderstorm in Yuxi region are analyzed by using the data obtained from Yunnan Lightning Location System and atmospheric electric field mill from July 2006 to June 2007. The results show that there exist diurnal and monthly atmospheric electric field variations in fair weather in the lower latitude plateau. The charge structures of thunderstorm are both dipole and tripole, but most thunderstorms have a dipole charge structure. Thunderstorms of different charge structures are of different characteristics of discharge. The negative polarity of electric field underneath thunderstorm is main negative discharge and the activity of the cloud-to-ground (CG) flash is very active. The positive polarity of electric field underneath thunderstorm is main positive discharge and the activity of the cloud-to-ground flash is very weak. The methods of the CG lightning warning by the electric field mill are studied based on the variation characteristic of thunderstorm electric field. The polarity change early warning method is proposed for the first time. Its POD and LT are better than that of the threshold warning method.

**Key words:** electric field mill; CG lightning warning; polarity reversal; the lower latitude plateau; Yunnan province