

江淮地区一次雷暴过程双极性窄脉冲事件活动特征的相关研究

陈燕玲,刘非凡,祝宝友,彭长志,马明

(中国科学技术大学地球和空间科学学院,安徽合肥 230026)

摘要: 利用2014年8月5日江淮地区一次产生多个双极性窄脉冲事件(narrow bipolar event, NBE)的雷暴个例,结合空基资料(TRMM卫星,NCEP/CPC Global IR Dataset)和地基资料(闪电探测和多普勒雷达回波数据),讨论了NBE与雷暴相关参数的关系以及位于不同雷暴区域NBE的孤立性和辐射强度。结果表明,NBE主要发生在云顶温度小于210 K、极化修正亮温(PCT-85)小于100 K的雷暴对流旺盛区域。通过分析NBE与30 dBZ多普勒雷达回波最大发展高度及闪电频次的关系,发现NBE主要发生于闪电频次较高时期,且NBE与闪电频次的相关性强于其与30 dBZ雷达回波最大高度的相关性。对NBE孤立性及VLF/LF波段辐射强度的分析表明,大多数孤立NBE发生于雷暴发展期,位于20 dBZ及以下的NBE辐射强度最大且最孤立。

关键词: 双极性窄脉冲事件(NBE); TRMM卫星; 雷达回波垂直剖面; 辐射强度

中图分类号: P427.3 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.0253-2778.2018.12.006

引用格式: 陈燕玲,刘非凡,祝宝友,等. 江淮地区一次雷暴过程双极性窄脉冲事件活动特征的相关研究[J]. 中国科学技术大学学报,2018,48(12):1022-1032.

CHEN Yanling, LIU Feifan, ZHU Baoyou, et al. Analysis of the characteristics of narrow bipolar event in a thunderstorm process in Jianghuai region [J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2018,48(12):1022-1032.

Analysis of the characteristics of narrow bipolar event in a thunderstorm process in Jianghuai region

CHEN Yanling, LIU Feifan, ZHU Baoyou, PENG Changzhi, MA Ming

(School of Earth and Space Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

Abstract: The relationship between narrow bipolar events (NBEs) and thunderstorm parameters and the isolation and radiation intensity of NBEs in different regions of a thunderstorm on August 5th, 2014 in Jianghuai region was investigated based on the satellite-based NCEP/CPC Global IR data, TRMM PR/TIM data, and the ground-based radar and lightning detection data. The results show that NBEs mainly occurred in the convective areas of the thunderstorm with the cloud top temperature being less than 210 K and the polarization correction temperature (PCT-85) less than 100 K. By analyzing the correlation between NBEs and the maximum height of 30 dBZ radar echo and lightning frequency, the results also show that NBEs mainly occurred during the high frequency period of lightning, and that the correlation between NBEs and lightning frequency is stronger than that between NBEs and the maximum height of 30

收稿日期: 2018-05-10; **修回日期:** 2018-06-05

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFC1501501),国家重点基础研究发展(973)计划(2014CB441404),公益性行业(气象)科研专项(GYHY201306017),国家自然科学基金(41775004)资助。

作者简介: 陈燕玲,女,1993年生,硕士生。研究方向:大气电学。E-mail:cyl9308@mail.ustc.edu.cn

通讯作者: 马明,博士/副教授。E-mail:mingma@ustc.edu.cn

dBZ radar echo. The investigation of NBE isolation and the pulse peak intensity of VLF/LF band indicates that most isolated NBEs occurred in the early stage of the thunderstorm, and that the NBE radiation intensity below 20 dBZ was the strongest and most isolated.

Key words: narrow bipolar event (NBE); TRMM satellite; vertical cross-section of radar echo; radiation intensity

0 引言

双极性窄脉冲事件(narrow bipolar event, +NBE/-NBE)是一类具有较窄脉冲宽度(10~20 μs)、经常孤立于普通闪电的云内放电事件,能发出极强的甚高频(very high-frequency, VHF)和甚低频(very low-frequency, VLF)辐射,能够在地面及太空被探测到^[1-9]. 早期研究表明,NBE 与雷暴强对流之间存在一定的相关性,NBE 可作为监测雷暴对流强度的一种指标. 最新的研究表明,发生在云顶附近的负极性 NBE 可能是蓝色喷流(blue jet)事件的云内起始过程^[10]. 因此,分析 NBE 活动与雷暴对流特征之间的关系,对于探究雷暴如何发展演变具有重要意义,也是近年来云内放电事件的研究重点之一.

NBE 的产生与雷暴内部电荷粒子分布、雷暴形成的动力条件等有很大的关系^[6-7,11]. 国内外对闪电的研究^[12-14]表明闪电一定程度上能指示雷暴发生和发展的特征和趋势,而 NBE 的发生同雷暴中对流活动的关系更为紧密. 因此利用 NBE 监测雷暴对流强度的首要任务,是分析 NBE 与普通闪电、雷暴相关物理参数之间的关系^[15-16]. Suszcynsky 等^[17]利用美国 Los Alamos Sferic Array (LASA)观测系统以地闪为对流强度指示分析美国佛罗里达地区 NBE 与地闪关系,得到正极性 NBE 高度随着地闪频数增加有变高的趋势. Jacobson 等^[6]利用 LASA 系统观测资料对比分析 NBE、普通闪电与雷暴云顶温度之间的关系,发现两者均发生在雷暴云顶温度 -50°C 至 -60°C 之间. 在此基础上 Jacobson 等^[7]研究了 NBE、普通闪电与微波辐射 (TRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission)卫星上搭载的微波成像仪 (TRMM Microwave Imager, TMI)探测数据)之间的关系,发现 NBE 与普通闪电均发生在微波辐射低值区,即冰相粒子密集区域,说明 NBE 对应的雷暴区域对流旺盛,因此他们认为 NBE 同样可以作为指示雷暴对流强度的参量.

目前研究大多认为 NBE 主要发生在雷暴对流核附近区域. Smith 等^[4]首次利用 NEXRAD 天气监测雷达分析了 24 例正极性 NBE 与雷达回波的关系,认为正极性 NBE 大多数发生在雷达回波反射率超过 40 dBZ 的区域. Wu 等^[18]利用高时空分辨率相控阵雷达分析了产生 NBE 的雷暴水平和垂直结构,结果表明:在水平结构上正极性 NBE 发生在雷暴对流核附近而非正中心;垂直结构上,正极性 NBE 发生在雷暴内部,负极性 NBE 通常发生在云顶. 刘莎莎等^[19]利用重庆 VLF/LF 观测系统对西南地区 NBE、雷达回波进行分析,发现强对流更易产生 NBE,正极性 NBE 基本处于雷达回波反射率大于 40 dBZ 区域,负极性 NBE 集中产生于强对流核的云顶附近. 这一结果与 Smith 等^[4]、Wu 等^[18]的研究一致. 吕凡超等^[20]对东北地区只产生正极性 NBE 的两次雷暴进行了分析,结果表明正极性 NBE 倾向于发生在强雷达回波所对应的对流核外围区域.

除此之外,NBE 的辐射强度及孤立性对于理解 NBE 活动特征也具有重要的意义. 研究表明 NBE 能产生与地闪回击相当的电场变化, Willett 等^[2]将 18 例正极性 NBE 归一化到 100 km 距离处辐射源位置,得到 NBE 位于 VLF/LF 频段辐射强度的平均值约 8.0 V/m. Wu 等^[21]、Karunarathna 等^[11]分析正极性 NBE 的孤立性发现,正极性 NBE 孤立性强于普通闪电,且可触发其他普通云闪.

先前研究大多集中于 NBE 与雷达回波现象学的描述与统计,而对于发生在不同雷达回波 NBE 的孤立性与辐射强度并未进行详细的分析与讨论. 本文以 2014 年 8 月 5 日发生在江淮地区($114^{\circ}48'\text{E}$ ~ $117^{\circ}30'\text{E}$, $31^{\circ}30'\text{N}$ ~ $33^{\circ}30'\text{N}$)的一次雷暴过程为研究对象,利用闪电及 NBE 定位资料,结合多普勒雷达、TRMM 卫星及云图资料,分析该地区 NBE 与雷暴对流相关参数之间的关系,同时讨论了位于不同雷达回波 NBE 的孤立性与 VLF/LF 频段的辐射强度关系.

1 观测系统概况和数据

1.1 观测系统概况

江淮天电阵列是由安徽合肥、黄山、明光、淮北、阜南、安庆共 6 个观测子站组成的 VLF/LF 闪电观测网(图 1). 每个子站配备一台通过 GPS 接收机同步(精度优于 40 ns)的 VLF/LF 闪电信号采集系统, 系统可以实现闪电信号的连续无缝采集(采集频率为 5 M/s), 提供各类闪电事件 VLF/LF 频段(带宽 0.3~400 kHz)的电场波形^[8, 10, 20, 22-25], 可用来研究双极性窄脉冲事件、普通闪电与雷暴对流之间的气象学关系.

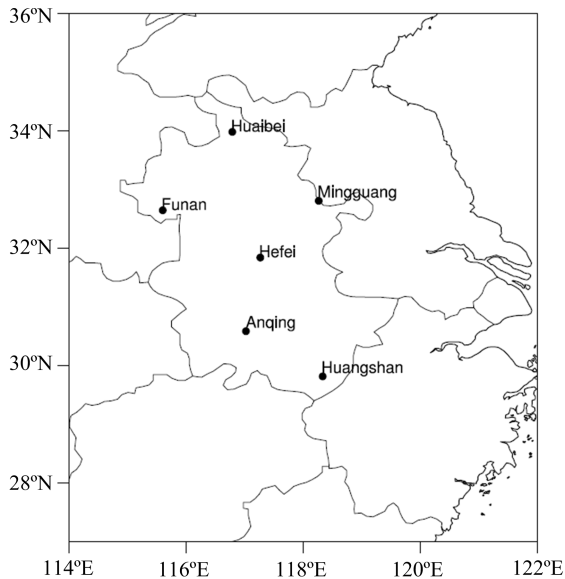


图 1 江淮天电阵列(站点均为江淮天电阵列闪电测站)

Fig. 1 Jianghuai-area spheric array

1.2 数据与方法

在江淮地区天电阵列的有效观测范围内, 本文选取了江淮地区 2014 年 8 月 5 日一次雷暴过程进行分析(本文分析均使用世界时, UTC). 该雷暴发生于 07:00 时, 结束于 14:00 时, 从阜阳以西往宿州方向移动, 覆盖范围广, 持续时间长, 为一次中尺度对流系统. 本文主要采用了闪电数据(普通闪电、NBE)、多普勒雷达资料及 TRMM 卫星等资料.

闪电资料为江淮天电阵列 VLF/LF 多站定位观测数据, 利用安徽合肥(HF, 117°16'E, 31°50'N)、阜南(FN, 115°36'E, 32°38'N)、淮北(HB, 116°47'E, 33°59'N)、明光(MG, 118°16'E, 31°48'N)、黄山(HS, 118°20'E, 29°49'N)5 站, 普通闪电采用基于查找表的到达时间差定位算法进行定位. 将相邻时间 1 s 内、距离 5 km 的事件归类为一个闪电^[25]. NBE

定位基于多站到达时间差法, 选取大于 3 站的闪电数据, 通过计算多站反射波与直达波的时间差实现 NBE 的高精度三维定位(具体实现方法可参考文献[22, 26]). 依据秦子龙等^[23]使用的蒙特卡洛方法模拟站网内定位误差, 本文中所选取 NBE、闪电位置的定位误差小于 2 km. 所分析雷暴一共产生 71 例 NBE, 其中 70 例正极性 NBE, 1 例负极性 NBE. 由于负极性 NBE 的样本数量过小, 论文仅以正极性 NBE 为研究对象.

多普勒雷达资料来源于安徽合肥站, 利用径向和方位上的最近距离法和垂直线性内插法将雷达基数据插值到笛卡尔坐标系, 形成水平分辨率为 0.01°×0.01°、垂直分辨率为 500 m 的三维格点数据^[27-28]. 卫星资料为 TRMM 观测资料和 NCEP/CPC Global IR 云图资料. TRMM 卫星数据在众多雷暴过程的研究中得到广泛的应用^[28-30], 本文使用了 PR 2A25 轨道雷达回波资料、TMI 1B11 轨道资料. 其中 PR 是 13.8 GHz 主动式探测雷达, 垂直分辨率为 250 m, 水平分辨率为 4.3 km. TMI 采用高频 85 GHz 极化修正亮温(PCT-85)^[29], 用来表征冰相粒子的微波散射信息. 卫星云图资料为 NCEP/CPC 全球红外云顶温度, 覆盖南北纬 60°, 空间分辨率为 4 km, 时间分辨率为 30 min, 可以监测大范围雷暴云的活动演变特征^[25].

2 分析结果

2.1 NBE 与雷暴对流降水活动的关系

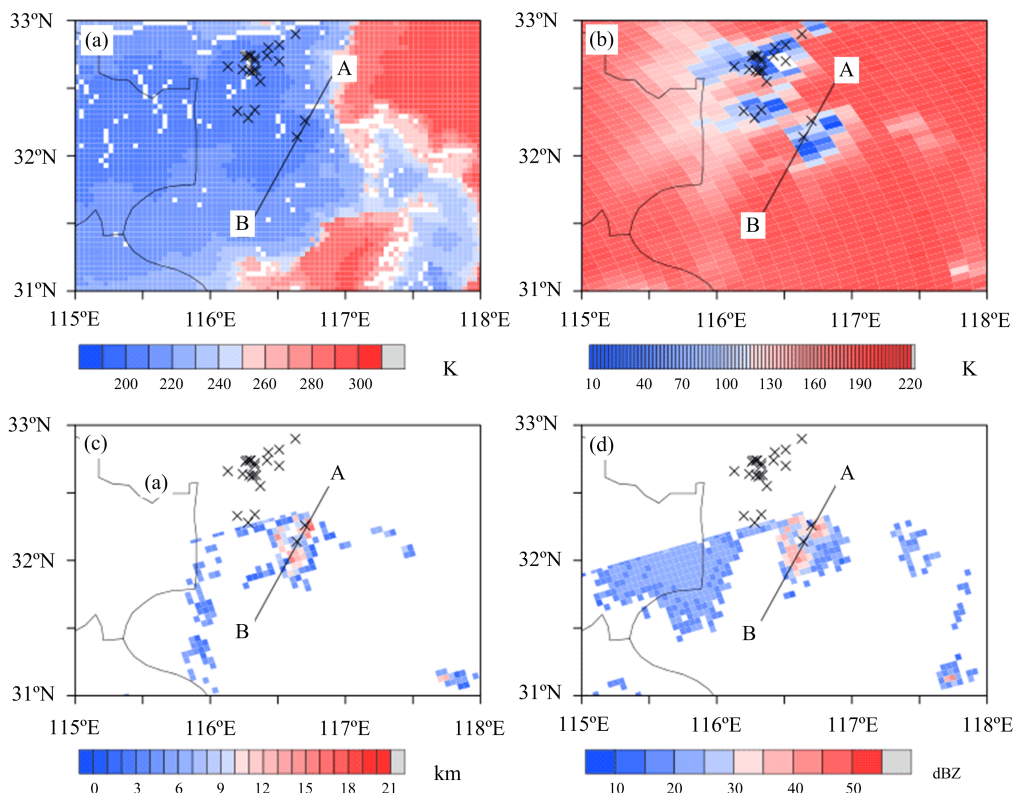
吕凡超^[30]利用 TRMM 卫星资料对 2012 年江淮地区产生 NBE 的个例进行分析, 结果表明正极性 NBE 发生在红外云顶温度小于 210 K、PCT-85 小于 150 K 的对流核区域, 但 PCT-85 最低值与 NBE 所在区域有所偏移, 正极性 NBE 所处区域 30 dBZ 雷达回波最大高度约为 15 km. 为探究此次雷暴对流与 NBE 的关系, 本文同样利用 TRMM 卫星资料进行如下分析.

TRMM 降水雷达卫星轨道 95239 扫描到了此次雷暴对流发展过程中部分对流核的降水结构. 此条轨道扫描时间为世界时 10:52~10:54, 该时段正好处于该雷暴发展强盛期. 一些研究^[6, 16]表明, NBE 易发生在云顶温度 220 K 左右、PCT-85 值低于 145 K 的区域. PCT-85 值表示冰相粒子散射信息, PCT-85 值越小, 散射效果越显著、冰相粒子越多. 图 2(a)给出了 2014 年 8 月 5 日 11:00~11:30

时雷暴云顶温度分布图, 图示“x”为 NBE. 选取轨道扫描前后 15 min 的 NBE 数据进行分析, 期间总共记录到 25 例 NBE. 这一时段内雷暴存在一个明显对流核, 整个对流系统跨度一百多公里. NBE 发生区域云顶温度小于 210 K, 为轨道扫描范围内的温度低值区. 图 2(b) 为 PCT-85 分布图, 与图 2(a) 相比, 明显看出仅 NBE 发生区域 PCT-85 小于 100 K, 表明 NBE 易产生在冰相粒子较多的强对流区域, 这一结果与 Jacobson 等^[7] 结果较为一致.

由于轨道扫描区域有限, 仅两例 NBE 在扫描范

围内部. 图 2(c) 为 2A25 轨道雷达回波大小为 30 dBZ 的最大发展高度, 图 2(d) 为 10 km 高度层的 2A25 轨道雷达回波. 由图 2(c) 可以看出, 大部分区域雷达回波未达到 30 dBZ, NBE 仅发生在发展较高的雷暴核中, 且该区域 30 dBZ 最大高度可达 16 km. 如图 2(d) 所示, 两例 NBE 均发生在雷达反射率大于 30 dBZ 的对流核附近. 为了更好地阐释 NBE 与对流系统降水结构的关系, 我们沿图中 AB 线段对对流区域降水结构做垂直剖面图.



(a) 云顶温度分布图; (b) PCT-85 分布图; (c) 30 dBZ 雷达回波最大发展高度; (d) 10 km 高度雷达回波. 图中黑色“x”符号代表正极性 NBE 的位置.

图 2 NBE 事件与卫星观测结果的比较

Fig. 2 Comparison between NBE event and satellite observation

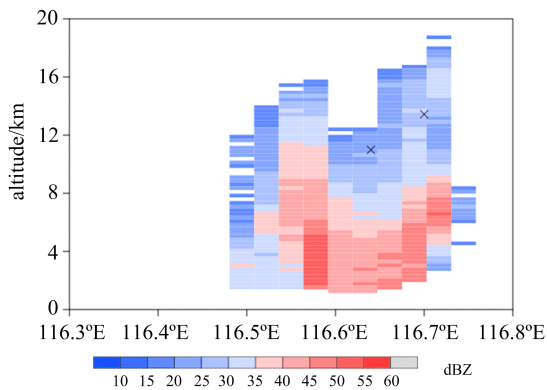
图 3 为沿 AB 线段对流核的垂直降水结构. 剖面显示雷达回波 30 dBZ 最大高度达到了 16 km. 两例正极性 NBE 发生高度分别为 11 和 13.4 km, 分别位于雷达回波反射率为 20, 30 dBZ 区域, 均发生在雷暴核上方.

综上, 根据 NBE 事件与云顶温度、冰相粒子及雷暴结构的分布情况, 表明此次雷暴对流旺盛, 发展范围较广. 与吕凡超^[30] 结果相对比, NBE 主要发生在云顶温度低于 210 K、PCT-85 低于 100 K 冰相粒子较多的雷暴对流核附近区域, NBE 位于 PCT-85 低值区的中心位置, 并未出现偏移的情况. 研究

NBE 与雷暴对流的关系, 还需结合地面多普勒雷达资料及地面闪电观测资料进行分析.

2.2 NBE 的时间分布特征

Martinez 等^[31] 研究高原地区雷暴发现, 闪电仅产生于 40 dBZ 回波高度高于 7 km 的雷暴中. Wiens 等^[16, 25] 发现闪电的发生与 30 dBZ 雷达回波最大高度有一定关系. 此次雷暴过程中 TRMM 卫星资料分析结果表明, NBE 发生在 30 dBZ 雷达回波发展最大高度达到 16 km 的区域. 可见雷达回波的高度对于 NBE 的发生有一定的指示意义. 为探讨 NBE 与雷达回波之间的关系, 我们绘制多普勒雷达



图中黑色‘x’符号代表正极性 NBE 的位置。

图 3 图 2 中 AB 线段对应的雷达回波垂直剖面图

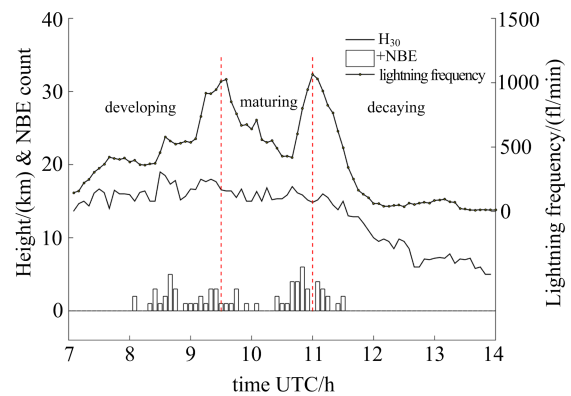
Fig. 3 Radar vertical cross-section of AB line shown in Fig. 2 回波垂直剖面图,选取 30 dBZ 回波最大发展高度,结合地面闪电数据对此次雷暴过程随时间演变关系作如下分析。

图 4 为闪电频次、NBE 与 30 dBZ 雷达回波最大高度(图中用 H_{30} 表示)随时间的分布图。多普勒雷达每 5 min 体扫一次,取每 5 min 雷达垂直剖面图中 30 dBZ 雷达回波最大高度,NBE 为每 5 min 内的总次数,闪电频次为每 5 min 内的平均值。横坐标为雷暴发生时间,左侧纵坐标轴为 30 dBZ 雷达回波最大高度及 NBE 数量,右侧纵坐标轴为闪电频次。结合闪电频次与 30 dBZ 雷达回波最大高度随时间变化趋势^[25],将此次雷暴过程分为三个阶段:发展阶段为 07:00~09:30;成熟阶段为 09:30~11:00;消散阶段为 11:00~14:00。

如图 4 所示,08:05 时刻产生第一例 NBE,相应的 30 dBZ 回波最大高度为 15km,11:30 之后 NBE 不再产生,此时 30 dBZ 雷达最大发展高度为 15 km。发展阶段、成熟阶段及消亡阶段 NBE 的数量分别为 30,28,12 例。09:00~09:30 时段、10:40~11:05 时段内,30dBZ 雷达回波最大高度及闪电频数出现了一个较为明显的增长过程,分别产生了 12 例、21 例 NBE。09:35~10:35 时间段内闪电频数呈现明显的下降趋势,30 dBZ 雷达回波高度变化较小,1 h 内仅产生 11 例 NBE。闪电频数分别于 09:30,11:00 时刻出现两个峰值,由图可以看出,峰值出现时段内,NBE 发生较多。11:05 以后闪电频数和 30dBZ 回波最大高度整体呈下降趋势,11:05~14:00 之间共产生 8 例 NBE。

Suszczynsky 等^[17]研究佛罗里达地区 NBE 与普通闪电关系,发现普通闪电频数增加时 NBE 也会随

之增加。刘莎莎等^[19]、吕凡超等^[30]认为 NBE 在时间上具有一定的聚集性,NBE 集中出现于总闪频次较大的阶段。此次雷暴过程也同样说明 NBE 发生于闪电频次较大的阶段。值得注意的是,该雷暴产生的 70 例 NBE 中,仅有 1 例 NBE 发生在 30 dBZ 雷达回波最大高度低于 15 km 高度的雷暴中,且闪电频次较高时段对应的 30 dBZ 雷达回波最大高度也较高。这与 Wiens 等^[16]的结果具有一致性,说明只有当雷暴对流到达一定强度时,NBE 才能产生。在此基础上本文将从 NBE 活动特征与雷达回波垂直剖面的位置关系进一步分析 NBE 与雷暴对流关系。



黑色带圆点折线代表的是闪电频次,柱状图为 NBE 个数,折线为 30 dBZ 雷达回波的最大高度。

图 4 闪电频次、NBE 及 30 dBZ 雷达回波最大高度随时间分布图

Fig. 4 Distribution of lightning frequency, NBE and maximum height of 30 dBZ radar echo with time

2.3 NBE 的空间分布特征

同雷达回波剖面图的比较有助于直观分析 NBE 与雷暴对流强度及云内电荷分布的关系^[11,18-19]。Yuter 等^[32]分析美国肯尼迪卫星发射场地区的雷暴时发现,三极性电荷结构模式存在强烈上升和下降气流。Stolzenburg 等^[33]认为中尺度对流系统的电荷结构在对流区及对流区外围及层状区差异明显。本文绘制了雷达垂直剖面图,并根据不同位置的 NBE 探讨其电荷结构可能分布情况、NBE 孤立性及其在 VLF/LF 波段的辐射强度。

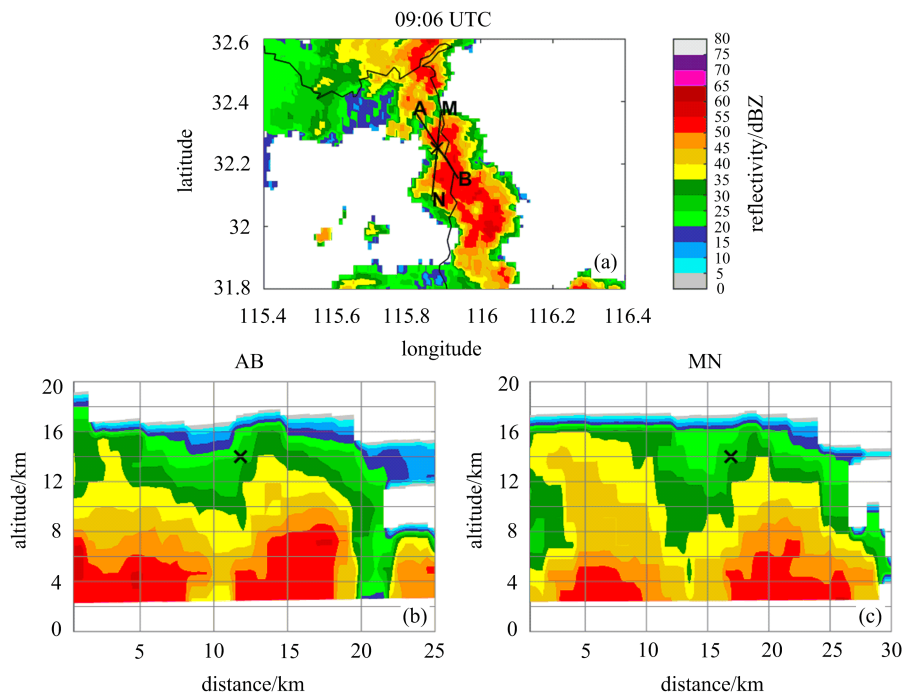
将对流区反射率 ≥ 35 dBZ 雷达回波区域定义为雷暴核^[11],当降水粒子被强上升气流带向上层时,雷暴核也向上扩展。根据中尺度对流系统不同区域对应不同电荷结构,本文归纳了 70 例 NBE 与雷达回波垂直剖面图的位置关系,将统计结果分为三类:A 类发生于雷暴强对流核(≥ 35 dBZ),共有 11 例(15.7%);B 类发生在雷达回波 20~35 dBZ 之

间,共有 40 例(57.1%);C 类发生在雷达回波 ≤ 20 dBZ 弱回波区域,共有 19 例(27.2%)。

分类方法参考 Karunarathna 等^[11]分析佛罗里达州地区 172 例正极性 NBE 所用的方法.文献[11]将 NBE 分为三类:第一类位于雷暴核内部或上部;第二类位于对流区域但不属于第一类;第三类位于雷暴砧区.文献[11]在进行三类分类时,注意到第一类、第二类分类时存在界定不清的情况,如当出现对流核倾斜的情况时,难以客观分辨 NBE 是位于对流核的上方还是位于对流核侧边.为防止此情况发生,并结合电荷粒子分布情况,本文将文献[11]中第一类 NBE 细分为了 A、B 两类,这两类 NBE 总数占 72.8%,这一结果与文献[11]中第一类 NBE 比例基本一致. ABC 三类 NBE 早期被 Smith 等^[26]、Wu

等^[18]及吕凡超等^[20]进行过相关介绍,但均未对不同位置 NBE 的孤立性及辐射强度进行详细分析.本文试图通过分类,探讨不同剖面上 NBE 在孤立性、辐射强度及该垂直结构电荷分布上的特征.

图 5 给出了此次雷暴 09:06 时刻仰角为 1.4° 雷达回波的平面显示图.根据此时雷暴与雷达站的距离,取仰角 1.4° 能较好地展现该时刻 NBE 定位点与雷达回波的位置关系.本文对 NBE 所在的回波区以 22.5° 角度在平面内绘制 8 个剖面(如图 5(a)中 AB, MN),对比 8 个剖面 NBE 所在位置,归类为 ABC 其中一类^[11].图 5(b)和(c)给出了雷达回波平面显示图上相对应线段的垂直剖面图.根据 NBE 所在剖面图的雷达反射率大小,将此例 NBE 归类为 B 类.



(a)平面位置显示,图中 AB 和 MN 分别代表两个垂直剖面的位置;(b)图 5(a)中 AB 线段对应的垂直剖面图;
(c)图 5(a)中 MN 线段对应的垂直剖面图.图中黑色‘x’符号代表 NBE 位置.

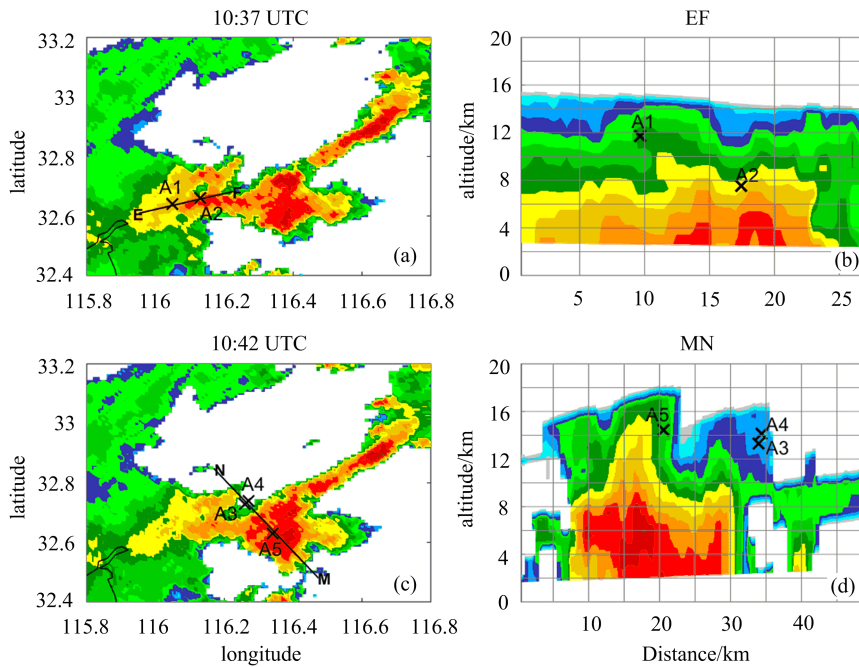
图 5 09:06 时仰角为 1.4° 雷达回波反射率与 5min 内 NBE 定位点叠加图

Fig. 5 Location of NBE during 5 min in comparison with the radar echo reflectivity
(at the elevation angle of 1.4°) at 09:06 UTC

本文对此次产生 NBE 的雷暴过程均绘制了剖面,根据雷达回波资料,将相应每 5min 时间间隔内的 NBE 定位点叠加于雷达回波平面图,并根据 NBE 所处位置绘制剖面图.图 6 给出了两个时刻雷达平面图及某一方向的垂直剖面示意图,其中 A1~A5 为 NBE 个例.图 6(a)为 10:37 时刻的雷达回波平面图,A1, A2 位于雷达回波为 40 及 50 dBZ 的区

域.图 6(b)为沿着 6(a)图中 AB 线段绘制的剖面图,横坐标为 A 到 B 的距离,剖面图中 A1, A2 分别位于雷达回波为 30, 35 dBZ 的区域,高度分别为 11.8, 7.6 km,根据分类标准,将 A1, A2 分别归类为 B, A 类.按同样的分类方法,可将图 6(c)中 CD 线段剖面的 A3, A4 归类为 C 类, A5 为 B 类.

下面进一步分析 ABC 三类 NBE 发生高度及时



图中 A1~A5 为 NBE 个例. 图中黑色 'x' 符号代表 NBE 位置.

图 6 仰角为 1.4° 雷达平面显示图及雷达垂直剖面图与对应 5 min 内 NBE 叠加图

Fig. 6 Location of NBE during 5 min in comparison with the radar echo reflectivity (at the elevation angle of 1.4°)

间的差异性. 先前研究^[4,6,26]表明, 正极性 NBE 高度主要位于 7~15 km 之间. 图 7(a) 为 ABC 三类 NBE 高度分布图, 图中 B, C 类 NBE 在 8~16 km 之间均有分布, C 类 NBE 主要分布于 12~17 km 之间. 图 7(b) 为三类 NBE 随雷暴发展过程的数量情况, C 类 NBE 主要发生在雷暴发展、成熟阶段.

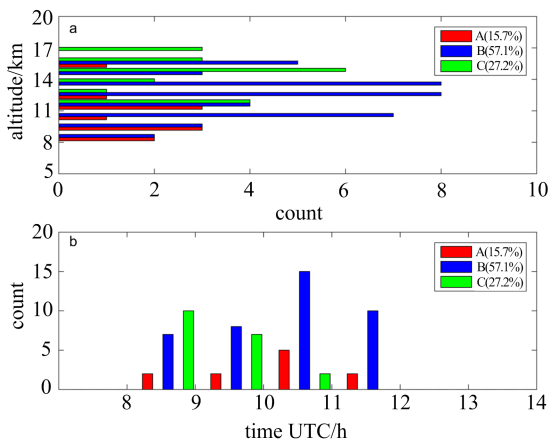


图 7 (a)三类 NBE 高度分布图; (b)三类 NBE 数量随时间分布图

Fig. 7 (a)Height distribution of three categories NBE; (b)time evolution of three categories NBE quantities

2.4 NBE 的孤立性与峰值幅度

NBE 与其他普通闪电相比具有一定孤立性^[1, 21, 34]. Wu 等^[35]分析了 2011 年广州 14 个雷暴

日产生的大量正、负极性 NBE 的孤立情况, 结果表明正极性 NBE 很有可能是普通云闪的启动过程. 本文对 70 例 NBE 进行孤立性分类^[30], 通过分析 NBE 前后 1s 内是否有其他普通闪电事件与其距离大于 10 km 作为判断依据. 对此, 将 70 例 NBE 分为以下四类: ①孤立 NBE, 即规定时间及范围内不存在其他闪电及 NBE, 共 45 例孤立 NBE(64.3%); ②仅发生在普通闪电之前的 NBE, 共 11 例(15.7%); ③仅发生在普通闪电之后的 NBE, 共 9 例(12.9%); ④前后均有普通闪电发生的 NBE, 共 5 例(7.1%).

如图 8(a) 所示, 为四类不同孤立性的 NBE 随雷暴发展演变过程中的分布情况. 如黑框部分所示, 在雷暴发展时期, 除了 3 例非孤立 NBE, NBE 基本以孤立状态存在. 在高度分布上, 四类 NBE 不存在明显的差异性.

早期的研究表明, NBE 能产生与地闪回击相当的脉冲峰值^[2,36]. Wu 等^[21]利用 VLF/LF 闪电定位网对 NBE 电场变化进行分析时, 由于电场值未标定, 采用数字信号 (digital units) 为单位. 考虑到江淮天电阵列网同样未对电场进行标定, 本文采用归一化到 100 km 处的明光观测站的脉冲峰值幅度来表征 NBE 在 VLF/LF 频段的辐射强度. 具体方法为将采集到的波形脉冲峰值归一化到 -5~5 V 的

电压值内,再进行距离归一化到 100 km 处,得到 NBE 脉冲峰值幅度(负号表示电场方向),单位为 V. 此次雷暴有 9 例 NBE 峰值过饱和,进行剔除处理. 虽然在电场值未标定的情况下,此次雷暴 NBE 电场变化无法与其他研究进行对比,但对于自身雷暴过程分析不存在影响.

图 8(b)为四类 NBE 峰值幅度的时间演变图. NBE 峰值幅度平均值为 -5.10 V,其中孤立的 NBE 平均值为 -5.10 V,发生在普通闪电之前的 NBE 为 -5.06 V,发生在普通闪电之后的 NBE 为 -5.68 V,普通闪电相伴的 NBE 为 -4.27 V. 发生在普通闪电之后的 NBE 幅度略大,普通闪电相伴的 NBE 最小. 由图 8(b)可以看出,NBE 峰值幅度在雷暴各个阶段均呈现出较大的变化幅度,随着雷暴发展并没有表现出明显的趋势性.

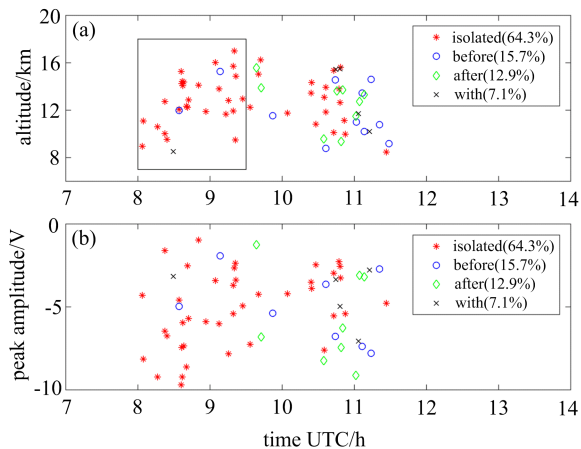


图 8 (a)不同孤立性 NBE 高度的时间演变图;(b)不同孤立性 NBE 峰值幅度时间演变图

Fig. 8 (a)Time evolution of different isolated NBE height; (b) time evolution of different isolated NBE peak amplitude

根据 NBE 所处的不同雷暴位置并结合四类孤立性,本文还讨论了 ABC 三类 NBE 与不同孤立性之间的关系. 如表 1 所示,为三类不同回波位置 NBE 峰值幅度及孤立性分类,其中 C 类 NBE 的幅度为 -5.66 V,大于 A, B 两类, B 类 NBE 幅度最小. A 类孤立与非孤立 NBE 占比接近 1:1, B 类孤立与非孤立比例为 5:3, C 类则接近为 4:1. 这一结果表明 C 类相比其他 NBE 峰值幅度略大,孤立性较强于其他两类 NBE.

根据三类 NBE 的孤立性、峰值幅度,结合雷暴动力条件及电荷结构,我们进一步探讨了三类 NBE 产生机制的差异性. 一个典型雷暴的上升区域有如

下电荷分布:主负电荷区;上部正电荷区;屏蔽电荷区^[33,37]. 由图 6 中 ABC 三类 NBE 在雷达回波垂直剖面中的位置可知,产生正极性 NBE 的电荷结构应为上部为正电荷层,下部为负电荷层. 此次雷暴产生的 A, B 两类 NBE 均发生在雷暴对流区,该位置雷暴对流发展旺盛,冰相粒子较多,容易形成利于产生正极性 NBE 的电荷结构.

C 类 NBE 全部偏离对流中心,有关探空电场资料的分析表明,该区域的电荷结构较为复杂,并不完全是简单的三极性电荷结构^[33,38]. C 类主要发生于雷暴对流旺盛的发展、成熟阶段,对于发生高度较高的 C 类 NBE,如图 6(d)所示 NBE 发生在砧状区域,砧区由冰晶粒子组成,以正电荷区为主,负电荷屏蔽层一般位于高出砧区 500~800 m 高度处^[39-40]. 当砧区附近存在剧烈气流扰动时,负电荷屏蔽层可能会卷入正极性电荷层,产生正极性 NBE.

表 1 三类 NBE 辐射强度及孤立性统计结果

Tab. 1 Statistic on peak amplitude and isolation for three categories of NBE

参数	A	B	C
峰值幅度/V	-5.16	-4.80	-5.66
四类孤立性/例			
孤立 NBE	5	25	15
普通闪电之前	3	6	2
普通闪电之后	2	5	2
闪电相伴产生	1	4	0

3 讨论

此前较少研究雷暴不同生命史 NBE 的活动特征. 此次雷暴过程一共产生了 70 例正极性 NBE, 根据 30 dBZ 雷达回波最大发展高度、闪电频次及 NBE 的关系,将此次雷暴分成了三个阶段:发展阶段、成熟阶段、消亡阶段. 如表 2 所示为雷暴三个阶段 NBE 的活动特征参数,接下来将从 NBE 发生高度、峰值幅度及孤立性进行阐述.

发展阶段产生 30 例 NBE,由图 8(a)可知高度分布于 8.3~16.0 km 之间,平均发生高度为 12.76 km,峰值幅度主要位于 -1~-10 V 之间,除了 3 例非孤立 NBE,其他均为孤立状态. 成熟阶段产生 28 例 NBE,高度平均值为 12.96 km,峰值幅度主要集中于 -3~-7 V 之间,平均峰值幅度为 -4.75 V,

三个阶段中幅值最小,孤立 NBE 居多. 消散阶段仅产生 12 例 NBE,平均高度为 11.43 km,与其他两个阶段相比高度较低,峰值幅度变化范围较大,孤立

NBE 仅有 1 例. 说明大多数 NBE 产生于雷暴发展及成熟阶段.

表 2 雷暴三个阶段 NBE 的参数情况

Tab. 2 Parameters of NBE of three stages of thunderstorm

参数	发展阶段(07:00~09:30)	成熟阶段(09:30~11:00)	消散阶段(11:00~14:00)
NBE 数量	30	28	12
高度平均值/km	12.76	12.96	11.43
峰值幅度平均值/V	-5.32	-4.75	-5.32
孤立性 NBE/例	27	17	1

此次雷暴一共产生 70 例 NBE,其中 69 例 NBE 发生于雷暴类型为其 30 dBZ 雷达回波最大高度在 15 km 以上,且 NBE 主要发生在闪电频次较大的时段,说明仅当雷暴对流达到一定强度时 NBE 才会产生. 但当闪电频次下降(在 09:35~10:35 时段)较为明显时,仍有个别 NBE 产生的情况. 众多学者^[6, 15-17]对雷达回波、普通闪电及 NBE 的关系进行了讨论,结论不尽相同. Jacobson 等^[7]认为 NBE 与常规闪电发生的雷暴环境几乎相同;Lapp 等^[15]对佛罗里达地区 2 月闪电数据进行分析,发现 NBE 与普通闪电之间的相关性较小;Wiens 等^[16]以 30 dBZ 雷达回波作为对流强度指示分析 NBE 与雷暴对流的关系,发现两者具有较好的一致性;刘莎莎等^[19]发现 NBE 与超过 40 dBZ 雷达回波体积呈对数曲线变化,与普通闪电呈正比例线性变化关系,说明 NBE 与普通闪电的相关性强于雷达回波. 此次雷暴过程产生的 NBE 与 30 dBZ 雷达回波最大高度、普通闪电频次的线性相关系数分别为 0.47,0.58,可见 NBE 与普通闪电频次的相关性要强于与 30 dBZ 雷达回波最大高度. 对于这一结果,还需要大样本统计加以验证.

4 结论

基于江淮地区 VLF/LF 天电阵列所记录的闪电定位数据,结合多普勒雷达及 TRMM 卫星、NCEP/CPC Global IR 云图等资料,我们对 2014 年 8 月 5 日江淮地区一次雷暴强对流过程产生的 NBE 活动特征,及其孤立性和辐射强度同雷达回波在雷暴不同位置的关系进行了分析. 研究的主要结果如下:

(I) TRMM 卫星及云图资料表明,正极性 NBE 主要发生于云顶温度小于 210 K、极化修正亮

温(PCT-85)小于 100 K、冰相粒子较多的区域.

(II)根据 NBE 前后 1 s 是否有其他普通闪电产生及与其空间距离是否大于 10 km,判断 NBE 是否孤立. 将 NBE 分为四类,45 例 NBE(64.3%)呈孤立状态,11 例(15.7%)发生在普通闪电之前,9 例(12.9%)发生在普通闪电之后,5 例(7.1%)与普通闪电相伴而生. 分析表明在雷暴发展阶段 NBE 基本处于孤立状态,NBE 的辐射强度随时间变化无明显趋势性.

(III)大多数 NBE 发生于雷暴发展及成熟阶段,当闪电频次在短时间内增长较为明显时,NBE 产生较多. 根据 NBE 与雷达回波垂直剖面的位置关系,将 NBE 分为三类:A 类位于 ≥ 35 dBZ 区域,即雷暴核区域,一共有 11 例(15.7%);B 类位于 20~35 dBZ 区域,共有 40 例(57.1%);C 类位于 ≤ 20 dBZ 的回波区域,共 19 例(27.2%). 进一步分析三类 NBE 的孤立性及辐射强度,结果表明这三类 NBE 中 C 类 NBE 辐射强度最大、最孤立.

由于此次雷暴产生的 NBE 数量样本较小,对于 ABC 三类 NBE 的孤立性及幅值情况,还需要大样本数据进行验证,这也是未来的工作之一.

参考文献(References)

- [1] LE VINE D M. Sources of the strongest RF radiation from lightning[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 1980, 85(C7): 4091-4095.
- [2] WILLET J C, BAILEY J C, KRIDER E P. A class of unusual lightning electric field waveforms with very strong high-frequency radiation [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1989, 94(D13): 16255-16267.
- [3] MEDELIUS P J, THOMSON E M, PIERCE J S. E and DE/DT waveshapes for narrow bipolar pulses in

- intracloud lightning [C]// The 1991 International Aerospace and Ground Conference on Lightning and Static Electricity. Gainesville, FL: NASA, Kennedy Space Center, 1991.
- [4] SMITH D A, SHAO X M, HOLDEN D N, et al. A distinct class of isolated intracloud lightning discharges and their associated radio emissions[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1999, 104(D4): 4189-4212.
- [5] JACOBSON A R. How do the strongest radio pulses from thunderstorms relate to lightning flashes? [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2003, 108(D24): 4778.
- [6] JACOBSON A R, HEAVNER M J. Comparison of narrow bipolar events with ordinary lightning as proxies for severe convection[J]. *Monthly Weather Review*, 2005, 133(5): 1144-1154.
- [7] JACOBSON A R, BOECK W, JEFFERY C. Comparison of narrow bipolar events with ordinary lightning as proxies for the microwave-radiometry ice-scattering signature [J]. *Monthly Weather Review*, 2007, 135(4): 1354-1363.
- [8] 祝宝友, 陶善昌, 谭涌波. 伴随超强 VHF 辐射的闪电双极性窄脉冲初步观测[J]. *气象学报*, 2007, 65(1): 124-130.
ZHU Baoyou, TAO Shanchang, TAN Yongbo. Initial observations of the lightning narrow bipolar pulse with very powerful VHF radiation[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2007, 65(1): 124-130.
- [9] JACOBSON A R, LIGHT T E L. Revisiting "narrow bipolar event" intracloud lightning using the FORTE satellite [J]. *Annales Geophysicae*, 2012, 30: 389-404.
- [10] LIU F, ZHU B, LU G, et al. Observations of blue discharges associated with negative narrow bipolar events in active deep convection [J]. *Geophysical Research Letters*, 2018, 45(6): 2842-2851.
- [11] KARUNARATHNA N, MARSHALL T C, STOLZENBURG M, et al. Narrow bipolar pulse locations compared to thunderstorm radar echo structure [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2015, 120(22): 11690-11706.
- [12] 马明, 陶善昌, 祝宝友, 等. 卫星观测的中国及周边地区闪电密度的气候分布[J]. *中国科学: D 辑*, 2004, 34(4): 298-306.
- [13] IE X, ZHOU Y, YUAN T. Global lightning activities and their regional differences observed from satellite [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2003, 46(6): 1068-1077.
- [14] WILLIAMS E R. Large-scale charge separation in thunderclouds[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1985, 90(D4): 6013-6025.
- [15] LAPP J, SAYLOR J. Correlation between lightning types[J]. *Geophysical Research Letters*, 2007, 34(11): L11804.
- [16] WIENS K C, HAMLIN T, HARLIN J, et al. Relationships among narrow bipolar events, "total" lightning, and radar-inferred convective strength in Great Plains thunderstorms[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2008, 113(D5): D05201.
- [17] SUSZCZYNSKY D M, HEAVNER M J. Narrow bipolar events as indicators of thunderstorm convective strength[J]. *Geophysical Research Letters*, 2003, 30(17): 1879-1883.
- [18] WU T, TAKAYANAGI Y, YOSHIDA S, et al. Spatial relationship between lightning narrow bipolar events and parent thunderstorms as revealed by phased array radar[J]. *Geophysical Research Letters*, 2013, 40(3): 618-623.
- [19] 刘莎莎, 董万胜, 吴亭, 等. 西南地区双极性窄脉冲事件与雷达回波的关系[J]. *高原气象*, 2014, 33(3): 801-810.
LIU Shasha, DONG Wansheng, WU Ting, et al. Relationship between narrow bipolar events and radar echo in Southwest China [J]. *Plateau Meteorology*, 2014, 33(3): 801-810.
- [20] 吕凡超, 祝宝友, 马明, 等. 东北地区两次雷暴中 NBE 的活动特征观测[J]. *中国科学: 地球科学*, 2013, 43(5): 848-861.
- [21] WU T, DONG W, ZHANG Y, et al. Comparison of positive and negative compact intracloud discharges [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2011, 116: D03111.
- [22] 刘非凡, 秦子龙, 祝宝友, 等. 基于闪电双极性窄脉冲事件波形观测日出日落电离层 D 层变化[J]. *地球物理学报*, 2018, 61(2): 484-493.
LIU Feifan, QIN Zilong, ZHU Baoyou, et al. Observations of ionospheric D layer fluctuations during sunrise and sunset by using time domain waveforms of lightning narrow bipolar events [J]. *Chinese J Geophys*, 2018, 61(2): 484-493.
- [23] 秦子龙, 祝宝友, 吕凡超, 等. 利用雷暴闪电事件监测电离层 D 层日间波动[J]. *科学通报*, 2015, 60(7): 654-663.
QIN ZiLong, ZHU BaoYou, LYU FanChao. Using time domain waveforms of return strokes to retrieve the daytime fluctuation of ionospheric D layer [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2015, 60(7): 654-663.
- [24] LV F, ZHU B, MA D, et al. A case study of the temporal context of narrow bipolar events with

- ordinary lightning[C]// 2010 Asia-Pacific Symposium on Electromagnetic Compatibility (APEMC). IEEE, 2010.
- [25] 高颖颖, 祝宝友, 马明. 东北较高纬度地区夏季闪电与雷暴相关参数的关系研究[J]. 中国科学技术大学学报, 2014, 44(11): 904-912.
GAO Yingying, ZHU Baoyou, MA Ming. Study on the relationship between lightning activities and thunderstorms over the high-latitude regions in Northeast China[J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2014, 44(11): 904-912.
- [26] SMITH D A, HEAVNER M J, JACOBSON A R, et al. A method for determining intracloud lightning and ionospheric heights from VLF/LF electric field records [J]. Radio Science, 2004, 39: RS1010.
- [27] 肖艳姣, 刘黎平. 新一代天气雷达网资料的三维格点化及拼图方法研究[J]. 气象学报, 2006, 64(5): 647-657.
XIAO Yanjiao, LIU Liping. Study of methods for interpolating data from weather radar network to 3D grid and mosaics[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2006, 64(5): 647-657.
- [28] 肖艳姣, 刘黎平, 李中华. 任意基线雷达反射率因子垂直剖面生成算法[J]. 应用气象学报, 2008, 19(4): 428-434.
XIAO Yanjiao, LIU Liping, LI Zhonghua. Arbitrary baseline radar reflectivity vertical cross section algorithm [J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2008, 19(4): 428-434.
- [29] SPENCER R W, GOODMAN H M, HOOD R E. Precipitation retrieval over land and ocean with the SSM/I: Identification and characteristics of the scattering signal [J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 1989, 6(2): 254-273.
- [30] 吕凡超. 东北和江淮地区 NBE 的多站观测与对比研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学; 2013.
LYU Fanchao. Comparative studies of NBEs at Greater Khingan Range and Jianghuai area based on multi-station observation[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2013.
- [31] Martinez M. The relationship between radar reflectivity and lightning activity at initial stages of convective storms [C]// 82nd Annual Meeting, First Annual Student Conference, Orlando, Florida. Boston, MA: American Meteorological Society, 2002.
- [32] YUTER S E, HOUZE R A. The natural variability of precipitating clouds over the western Pacific warm pool [J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1998, 124(545): 53-99.
- [33] STOLZENBURG M, RUST W D, SMULL B F, et al. Electrical structure in thunderstorm convective regions: 1. Mesoscale convective systems[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 1998, 103(D12): 14059-14078.
- [34] AHMAD M R, ESA M R M, COORAY V. Occurrence of narrow bipolar event as part of cloud-to-ground flash in tropical thunderstorms [C]// XV International Conference on Atmospheric Electricity, Norman, OK, 2014. International Union of Geodesy and Geophysics and International Association of Meteorology and Atmospheric Sciences, 2014.
- [35] WU T, DONG W, ZHANG Y, et al. Discharge height of lightning narrow bipolar events [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2012, 117: D05119.
- [36] EACK K B. Electrical characteristics of narrow bipolar events [J]. Geophysical Research Letters, 2004, 31: L20102.
- [37] STOLZENBURG M, MARSHALL T C. Charge structure and dynamics in thunderstorms[J]. Space Science Reviews, 2008, 137(1-4): 355-372.
- [38] MARSHALL T C, RUST W D. Electric field soundings through thunderstorms [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 1991, 96(D12): 22297-22306.
- [39] STOLZENBURG M, MARSHALL T C, KREHBIEL P R. Duration and extent of large electric fields in a thunderstorm anvil cloud after the last lightning[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2010, 115: D19202.
- [40] MARSHALL T C, RUST W D, WINN W P, et al. Electrical structure in two thunderstorm anvil clouds [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 1989, 94(D2): 2171-2181.