

1 doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1910.19161

2 北京三维闪电定位网及一次雷暴过程的闪电时空演化特征

3 王东方^{1,2}, 孙竹玲¹, 袁善锋^{1,2}, 卢晶雨^{1,2}, 郟秀书^{1,2}

4 刘明远^{1,2}, 徐燕³, 陆高鹏¹, 田野⁴

5 1 中国科学院大气物理研究所中层大气和全球环境探测重点实验室, 北京, 100029

6 2 中国科学院大学地球与行星科学学院, 北京, 100049

7 3 江西省人工影响天气领导小组办公室, 江西, 330096

8 4 北京市气象局气象探测中心, 北京, 100089

9

10 **摘要:** 北京闪电综合探测网 (Beijing Lightning NETwork, 简称 BLNET) 是
11 一个研究和业务相结合的区域性全闪三维定位网。2015 年, 对 BLNET 硬件、站
12 网布局及定位算法等方面进行了更新升级, 提高了传感器的灵敏度, 提升了运算
13 效率和探测性能。BLNET 不仅具备了对云闪、地闪脉冲类型的识别和电流峰值
14 估算等功能, 也实现了对闪电辐射脉冲的三维实时定位, 以及通道可分辨的闪电
15 放电过程精细定位。对 2017 年 7 月 7 日一次雷暴过程的闪电辐射源脉冲实时三
16 维定位结果分析表明, 这次雷暴过程一共观测到 11902 次闪电, 以云闪为主, 地
17 闪占总闪的 28%, 正地闪仅占总地闪的 5%, 雷暴成熟期, 最大闪电频数为 927 次
18 /6min。通过对比分析闪电辐射源位置 and 对应时刻的雷达回波, 发现辐射源基本
19 集中在强回波范围内。对一次正地闪的精细定位表明, 初始阶段表现出明显的预
20 击穿过程, 闪电辐射源的始发位置位于海拔高度约 5.4 km, 随后通道向上发展,
21 在约 10km 高度左右, 通道开始沿着水平发展。对一次负地闪的精细定位表明,
22 初始阶段放电首先从约 7.1km 高度处始发, 通道向南水平发展, 同时部分负先导
23 分支向下发展, 约 38ms 后, 通道短暂停止发展, 17ms 后, 通道始发处重新激发。

收稿日期 2019-05-23; 网络预出版日期:

作者简介 王东方, 男, 1980 年出生, 高级工程师, 主要从事大气电学研究。E-mail: wangdf@mail.iap.ac.cn

通讯作者 孙竹玲, sunzhuling@gmail.com

资助项目 国家自然科学基金重点项目 (41630425), 国际(地区)合作与交流项目 (41761144074) 和自然科学基金项目 (41875008)

Funded by National Natural Science Foundation of China (Grants 41630425), International (regional) cooperation and exchange project (Grants 41761144074), National Natural Science Foundation of China (Grants 41875008)

24 以上结果表明，BLNET 不仅可以对整个雷暴生命史闪电活动的三维实时定位和
25 监测，还可以实现对闪电三维放电通道的精细定位。

26

27 关键词：三维定位，BLNET，雷暴

28 Abstract: Beijing Lightning NETwork (BLNET) is a regional full-flash three-
29 dimensional (3D) location network combining research and business. In 2015, the
30 BLNET hardware, station network layout and location algorithm were updated and
31 upgraded to improve the sensitivity of the sensor and improve the computational
32 efficiency and detection performance. BLNET not only has the functions of intra-cloud
33 (IC) flash, cloud to ground (CG) flash pulse type identification and current peak
34 estimation, but also realizes the 3D real-time location of lightning radiation pulse and
35 the fine location of the channel-resolvable lightning discharge process. The analysis of
36 the real-time 3D location results of the lightning radiation source pulse during a
37 thunderstorm on July 7, 2017 shows that a total of 11,902 lightning flashes were
38 observed during the thunderstorm process. Most of which were dominated by IC flash,
39 and the CG flash accounted for 28% of the total flash. The positive cloud to ground
40 (PCG) flash only accounts for 5% of the total CG flash. During the mature period of
41 the thunderstorm, the maximum lightning frequency is 927 times/6 minutes. By
42 comparing and analyzing the location of the lightning source and the radar echo at the
43 corresponding time, it is found that the radiation source is basically concentrated in the
44 strong echo range. The fine location of a PCG flash indicates that the initial stage shows
45 a clear pre-breakdown process. The origin of the lightning source is about 5.4 km above
46 sea level, and then the channel develops upwards. At about 10 km, the channel begins
47 to follow Level development. The fine location of a negative cloud to ground (NCG)
48 flash indicates that the discharge first originates from a height of about 7.1 km, the
49 channel develops to the south, and some negative pilot branches develop downward.
50 After about 38 ms, the channel stops developing for a short time. After 17 ms, the
51 channel begins. The hair is re-energized. The above results show that BLNET can not

52 only locate and monitor the 3D real-time lightning activity of the whole thunderstorm
53 life history, but also realize the fine location of the lightning three-dimensional
54 discharge channel.

55 Keywords: Three-dimensional Lightning Location, BLNET, Thunderstorm

56 1 引言

57 高精度的闪电定位系统是闪电监测和研究的重要手段之一,近几十年来日趋
58 完善。雷电放电过程产生频谱范围很宽的电磁波,大部分能量集中在 300 MHz 以
59 下。因此,针对闪电放电辐射的不同频段电磁波,设计专门的仪器进行探测,利
60 用多个传感器组网进行同步观测,并通过发展物理模型和定位算法,可实现对闪
61 电的定位。

62 国际上,比较有代表性并具有业务功能的闪电定位系统是美国国家闪电定位
63 网(National Lightning Detection Network, NLDN)。自从 20 世纪 90 年代商业运
64 行以来, NLDN 已经升级了两次(Biagi et al., 2007; Cummins et al., 2006 年;
65 Jerauld et al., 2005)。另外,还有美国洛斯阿拉莫斯实验室发展的天电阵列 LASA
66 (Shao et al., 2006)和欧洲的 ZEUS、LINET(Chronis and Anagnostou, 2003, 2006;
67 Lagouvardos et al., 2009; Betz et al., 2009)等。除了业务化的闪电定位系统,近
68 几十年来,也涌现了许多优秀的能描述闪电发展通道的闪电定位系统,如闪电探
69 测和测距系统(Lightning Detection and Ranging, LDAR)(Maier et al., 1995; Poehler
70 and Lennon, 1979; Lhermitte and Krehbiel, 1979; Uman et al., 1978;)以及甚高频
71 (VHF)闪电图示系统(Lightning Mapping Array, LMA)(Hamlin, 2004; Thomas
72 et al., 2004; Krehbiel et al., 2000; Rison et al., 1999)等。

73 目前国内具有业务功能的地基闪电探测网包括:中国气象局的地闪定位网
74 (ADTD)、国家电网的地闪定位网。由于闪电具有随机性和瞬时性的特点,对闪
75 电的科学认识很大程度上依赖于高时空精度的探测手段。除了业务型的区域闪电
76 定位系统,近年来国内也发展了多个具有三维定位功能的研究型闪电定位网。如
77 国内张广庶等(2010)发展了类似 LMA 的闪电 VHF 辐射源三维定位系统(LLR),
78 可以获得雷暴云中的闪电辐射源三维时空发展物理图像(Li et al., 2012, 2013)。

79 Wu 等 (2016) 利用 LLR 获得的闪电资料研究了闪电放电初始预击穿过程。Fan
80 等 (2018) 发展了低频电场探测阵列 (low-frequency electric field detection array,
81 LFEDA), 刘恒毅等 (2019) 在重庆发展了一套双频段三维全闪电定位系统。Sun 等
82 (2013) 开发了 VHF 干涉仪定位系统, 并对一次人工触发闪电的发展过程进行
83 了研究。

84 北京闪电网 (BLNET) 从 2008 年开始建设, 但由于京津冀地区复杂的电磁
85 环境干扰, 早期的运行状态并不理想, 一直到 2013 年探测网络初步形成。王宇
86 等 (2015) 曾介绍了北京闪电网 BLNET 的网络构成与初步定位结果, 并通过对
87 2013 年一次雷暴过程的闪电二维定位结果和对应时次的雷达回波进行比较, 证
88 明了探测网络和定位方法的可靠性。之后 BLNET 实现了对闪电辐射源的三维定
89 位 (Wang et al., 2016), 但是由于无线电背景干扰问题, 对一次闪电的定位点数
90 较少。Srivastava 等 (2017) 对其二维定位结果进行了评估, 认为 BLNET 的全闪
91 探测效率为 93.2%, 对地闪探测效率为 73.9%。本文在此基础上, 进一步对 BLNET
92 进行了硬件升级和算法改进, 实现了对雷电的高时空分辨率探测和实时定位, 不
93 仅可为雷电的监测、预警提供重要的技术支撑, 也可以进行雷电放电通道的三维
94 精细定位, 为雷电物理和雷害机制研究提供资料基础。下面首先简要介绍一下
95 BLNET 的现有站网布局、硬件构成和算法, 然后利用实时闪电三维定位资料对
96 一次雷暴过程整个生命史的闪电活动进行分析, 最后结合对闪电过程放电通道的
97 三维精细定位, 来说明闪电的放电过程和 BLNET 的探测性能。

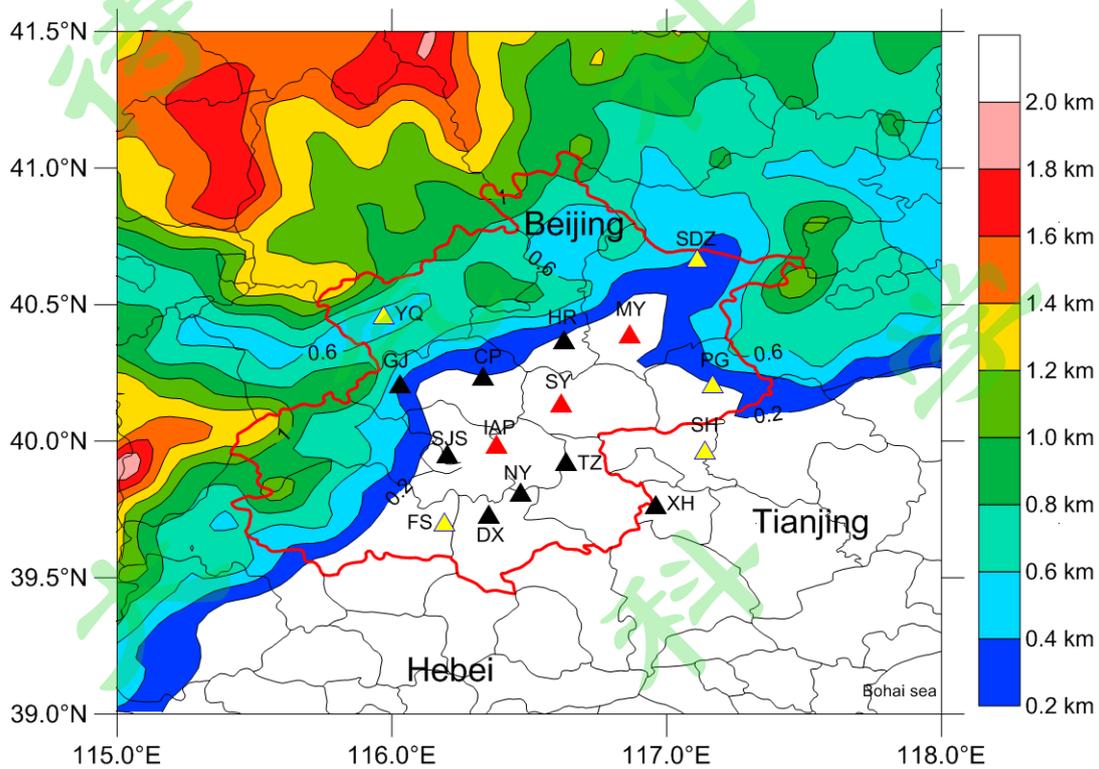
98 2 仪器介绍

99 2015 年, BLNET 在硬件、站网布局及定位算法等方面进行了重大升级和改进,
100 不仅实现了对雷暴过程的云闪和地闪辐射脉冲的全闪三维实时定位, 而且可以精
101 细描述闪电的放电通道结构。

102 1) BLNET 站网布局及系统硬件

103 图 1 给出了 BLNET 当前的测站分布和传感器配置。每个测站根据观测需要
104 配备不同的传感器, 主要有: 快天线、慢天线、磁天线以及甚高频传感器。2015
105 年 BLNET 在原来 15 个测站基础上, 在北京密云县东北部新增了上甸子站(SDZ),

106 形成了由 16 个测站组成的大网套小网格局。同时，至少每个测站配备 3 套及以上
 107 上的不同参量传感器，个别测站配备 4 套传感器（见图 1 (b) 中的红色三角形）。
 108 另外，在站网最外围的 5 个测站新增了磁场测量。BLNET 配置的四套传感器针
 109 对闪电不同的放电子过程进行探测，甚高频系统的中心频率 72 MHz，带宽 69~
 110 75 MHz；快、慢天线的工作频段均为 1.5 kHz~1.5 MHz，时间常数分别为 0.1ms、
 111 2ms；磁场测量系统的探测频段为 3 kHz~300 kHz。因此，目前的测站配置可实
 112 现对闪电的多频段多参量同步探测和记录。



113
 114

115 图 1 北京闪电定位网 (BLNET) 测站分布图

116 三角形代表测站位置 (红色: 快慢天线、磁天线和甚高频天线; 黑色: 快慢天
 117 线和甚高频天线; 黄色: 快慢天线和磁天线), 色标代表海拔高度, 横坐标: 经
 118 度, 纵坐标: 纬度

119 Figure 1 The station map of Beijing Lightning Location Network (BLNET) with
 120 terrain height shaded. The different color triangles represent observation stations with
 121 different equipments (red: fast and slow antenna, magnetic antenna and VHF antenna;
 122 black: fast and slow antenna and VHF antenna; yellow: fast and slow antenna and

123

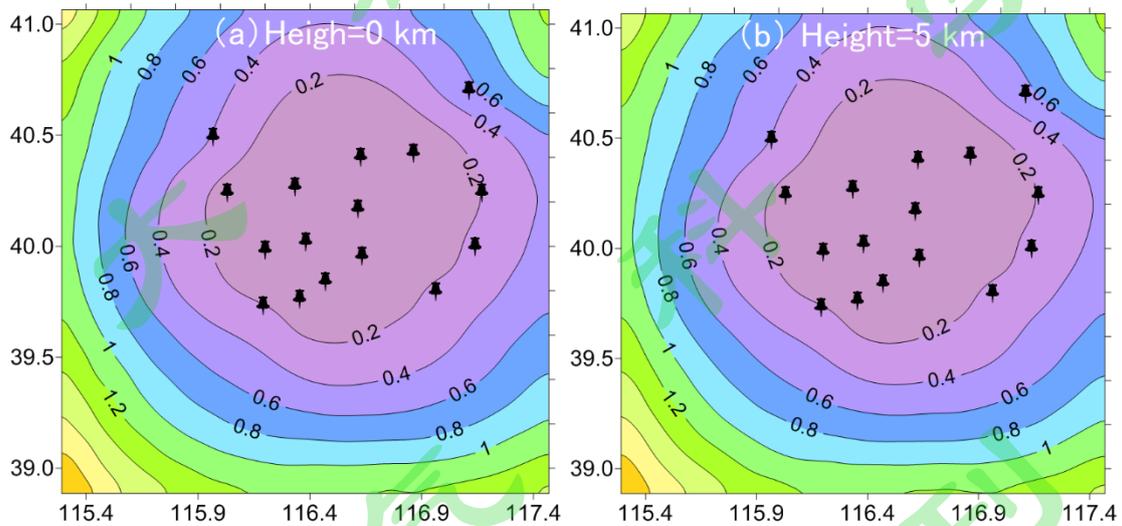
magnetic antenna), The abscissa is longitude, and ordinate is latitude.

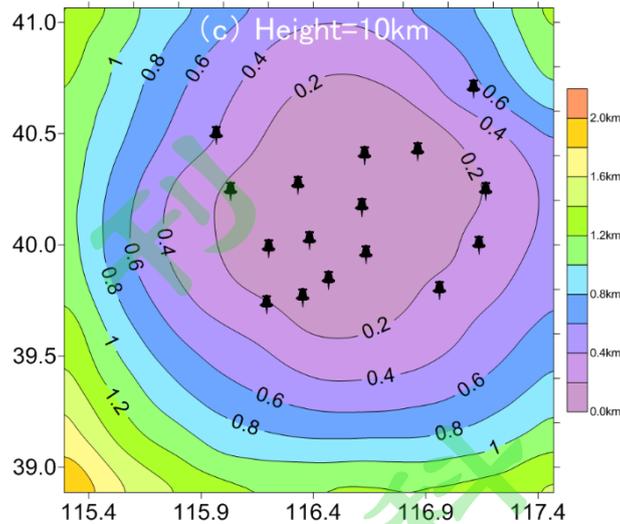
124

为定性了解 BLNET 升级后的误差分布，利用蒙特卡罗法 (Mente Carlo) 进行仿真模拟。模拟区域设定在以大气所站 (DQS) 为中心的 $150 \text{ km} \times 150 \text{ km}$ 范围，网格大小为 $3 \text{ km} \times 3 \text{ km}$ ，分成三个高度层 (地面、 5 km 和 10 km)。将辐射源置于每个网格点上，计算它们辐射的电磁波到达各观测站的时间，然后在此时间上叠加均值为零，标准差为 σ_T 的高斯随机噪声，最后利用算法反算辐射源的位置，通过和网格点的位置比较得到定位误差。假定 BLNET 的时间测量误差服从高斯分布，均值为 0，标准差 Δt 为 $0.4 \mu\text{s}$ ，并且假定所有的测站都能同时测量到闪电信号。图 2 (a) - (c) 分别给出三个高度层上 BLNET 升级后的水平定位误差的分布，对比王宇等 (2015) 可知，新增上甸子测站后，站网覆盖范围内的定位误差明显减小，定位误差小于 200m ， 400m 和 600m 的低值范围都大大增加，BLNET 北部的定位误差得到了明显改善。

134

135





136

137

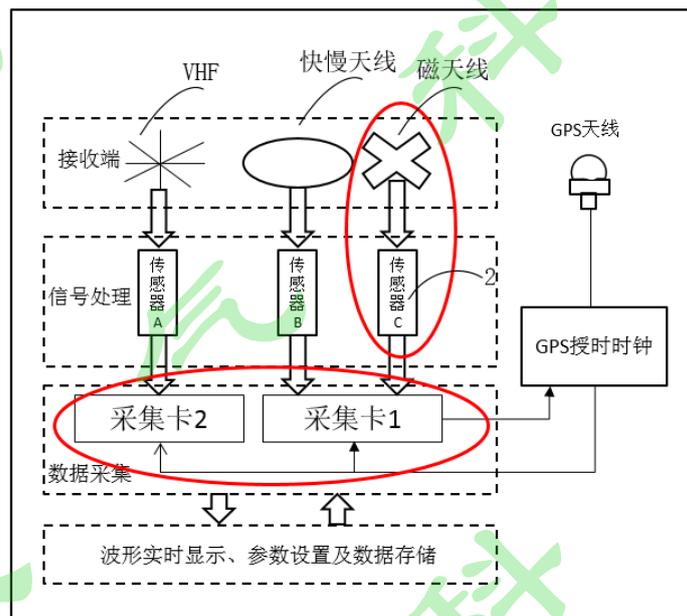
138 图 2 利用蒙特卡罗法模拟 BLNET 升级后的水平定位误差，假设 $\Delta t=0.4\mu s$ ，辐射
 139 源高度为 0 km, 5 km 和 10 km，模拟范围为 150 km \times 150 km，图中黑色钉子代
 140 表 BLNET 观测站，色标代表定位误差，单位：km，横坐标：经度，纵坐标：
 141 纬度，单位：度

142 Figure 2 The horizontal location error simulated by the Monte Carlo method
 143 after the BLNET upgrade (shaded, unit: km. abscissa: longitude, ordinate: latitude) at
 144 (a)0 km, (b)5 km and (c)10 km altitude. $\Delta t=0.4\mu s$, and the simulation range is 150
 145 km \times 150 km. Black nails represent BLNET stations.

146 以上的定位误差仿真的前提是 16 个测站都能测量到同一个辐射源的信息，
 147 因此，得到的定位误差是一个平均的效果。在实际的观测过程中，可能只有部分
 148 测站探测到同一个信号，实际的定位误差可能会随参与计算的站点数量的减小而
 149 稍微偏大。评估闪电定位系统实际定位误差最直接有效的办法是对比分析击中地
 150 面固定建筑物和闪电定位结果 (Wang 等, 2016)。本节主要利用击中大气所 325m
 151 气象铁塔 (39.9743 °N, 116.3712 °E) 及其周围高建筑物的光学资料讨论 BLNET
 152 的实际定位误差。2014-2018 年期间，高速摄像观测到了 14 次击中大气所气象塔
 153 及周围建筑物的负地闪回击，结果表明，BLNET 的最大定位误差 1351m，最小
 154 定位误差在 20m，平均定位误差 452m。值得指出的是。2017 年 8 月 11 日 04:01:03
 155 高速摄像观测到了一次击中大气所气象铁塔的地闪，这次地闪同时被 9 个测站探
 156 测到，对该次闪电一次继后回击采用不同测站的组合方式进行定位发现，随着采
 157 用测站数目的增多，定位误差存在减小的趋势，其 9 站定位结果距离大气所气象

158 铁塔位置约 20m。

159 除了增加测站，BLNET 也对硬件进行了优化。图 3 给出了 BLNET 单站硬
160 件构成，跟原来的系统总体架构基本一样，BLNET 单站的硬件系统主要由四大
161 部分组成，分别是信号接收端、信号处理、数据采集以及波形的显示和存储。升
162 级后的 BLNET 新增了磁场测量，数据采集方式由之前的一套采集系统增加到两
163 套（图 3 中红色椭圆所示），同时也对快、慢天线传感器的电路设计进行了优化，
164 提高了抗干扰能力。



165

166

图 3 BLNET 升级后单站硬件系统构成

167

Figure 3 Block diagram of the BLNET single station

168 数据采集方面，采用双卡并行运行模式替代之前的单卡运行模式。由于不同
169 信号的采样率不同，为满足对甚高频包络信号的采集，采集板卡的采样率需设置
170 为15MS/s，但是对于快、慢天线和磁天线的探测频段，此采样率的设置偏高。以
171 前的BLNET为了同时采集三路信号，对快、慢天线的两路信号进行降采样的操
172 作。这样做的弊端是会降低板卡的采样速率，死时间延长，闪电很频繁发生时，
173 会错过一些闪电。因此，为了能够同时对四种信号同步采集，同时尽可能地减小
174 数据量，降低死时间，新的BLNET采用了双卡并行采集模式。

175 BLNET 部分测站新增了具有很好闪电探测能力的磁天线，Lu 等（2014）早

176 期利用低频磁场传感器对闪电开展了相关工作，结果表明，低频磁场测量灵敏度
177 很高，能探测到较弱的闪电放电过程。Zhang 等（2016）和樊艳峰等（2017）曾
178 分别利用磁场遥感方法对双极性窄脉事件和人工引雷中的初始连续电流进行了
179 反演，取得了较好的效果。快、慢天线和甚高频系统的基本工作原理参见（王宇
180 等，2015；曹冬杰等，2011；王东方等，2009）。升级后的 BLNET 对快、慢天线
181 传感器电路进行了重新优化和设计，减小了电路分布参数。同时，为确保能在大
182 城市复杂电磁环境下工作，设计了滤波电路，有效提高了系统的抗干扰能力和数
183 据质量，并减少了电源扰动对信号的干扰等。

184 2) BLNET 的功能升级

185 除了硬件系统的改进，BLNET 也对软件架构进行升级，新增云闪、地闪脉
186 冲放电类型的识别、回击电流峰值的估算等功能。相对云闪脉冲，由于地闪回击
187 脉冲的波形特征独特，且对地闪波形的研究较多，因而脉冲的波形识别主要是针
188 对地闪回击电场脉冲进行识别。通过分析正、负极性脉冲波形的特征参数，识别
189 出脉冲的类型。地闪脉冲波形特征的识别判据主要包括 12 个参数，如脉冲波形
190 上升沿时间、下降沿时间、脉冲宽度以及回击脉冲的峰值点与回击前同一极性的
191 小脉冲的峰值点间的时间间隔等，各参数的量化是在大量历史资料统计基础上得
192 到（黎勋等，2017），实际的脉冲波形识别中，根据实际探测的回击脉冲波形进
193 行适当调整来提高识别准确率。由于存在单一测站识别有误的情况，因此，
194 BLNET 综合考虑多个测站对同一脉冲的类型判断结果，确定脉冲的最终类型。

195 BLNET 增加的第二个功能是发展了一种估算地闪通道中回击峰值电流强度
196 的方法。在各个测站同步得到并识别出一次回击产生的电磁场信号后，然后利
197 用时间差法得到地闪回击的位置信息，根据回击点与各测站间的距离可计算得
198 到该回击的峰值电流，最终取各站点回击电流估算结果的平均值即是该回击的
199 峰值电流强度。根据 Uman 等（1975）利用传输线模式对闪电回击电流电磁辐
200 射场的时域推导结果，回击峰值电流 I_p 的大小与探测仪测量得到的电场峰值强
201 度 E_p 和回击电流的传播速度 v 遵循如下表达式：

$$202 \quad I_p = \frac{2\pi D c^2 \epsilon_0}{v} E_{op} \quad (1)$$

203

204 其中, D 是探测仪到地闪回击接地点间的水平距离, c 为光速, ε_0 是真空介电常
205 数, 一般假设回击电流在通道内的传播速度是固定值。这里的 E_{op} 为回击产生的
206 地面电场, 但实际情况中, 天线并不是都放置在地表面, 而且场地周围地形、建
207 筑物等也会对电场造成畸变。因此, 假定畸变系数为 A , 则实际测量到的电场 E_P :

$$208 \quad E_P = A \times E_{OP} \quad (2)$$

209 式中 A 为场地快天线架高引起的电场变化系数和环境因素引起的电场变化系数,
210 可以通过与放置在地面齐平且周围环境较开阔的快天线测量结果进行对比得到。

211 3) BLNET 实时定位

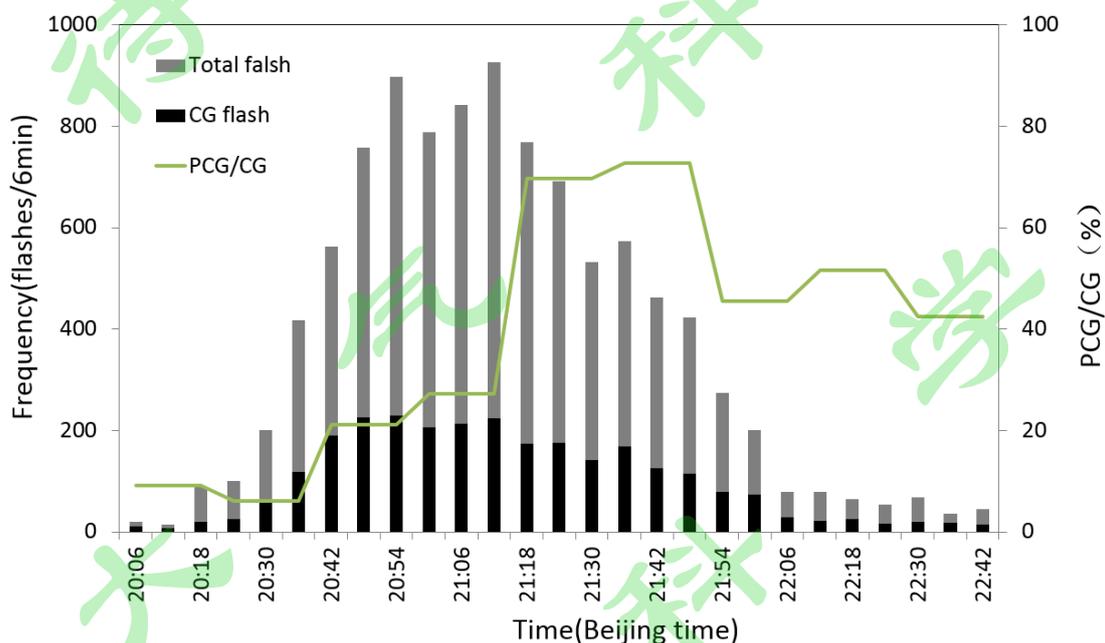
212 升级后的 BLNET 已经实现了实时业务化运行。通常情况下, 各测站采用快
213 天线触发的方式进行多通道闪电数据的同步采集。由于数据量较大, 原始采集数
214 据的实时回传难以实现。因此, 发展了闪电信号的本地化处理技术, 在各站进行
215 闪电波形信号本地快速寻峰、识别和压缩, 在保留有用信息基础上, 最大程度降
216 低回传数据量大小, 提高数据回传效率。处理保留的关键信息包括: 每个脉冲的
217 到达时间、脉冲的幅值以及云、地闪脉冲识别结果。中心站每隔 2 分钟自动进行
218 一次实时的二维辐射脉冲源定位并绘图输出闪电产品。另外, 所有的闪电产品自
219 动上传至中心站 FTP, 实现对北京及周边地区闪电活动的实时监测、预警。保留
220 在基站的闪电基数据可以进行事后的精细定位研究。

221 目前 BLNET 实时定位使用快天线实时峰值信息, 下文将针对一次雷暴过程
222 闪电辐射源进行三维定位并与对应雷达回波进行比较。另外, 利用快天线的原始
223 电场波形资料对闪电个例进行精细定位。

224 3 一次雷暴过程闪电时空分布特征

225 2017 年 7 月 7 日, 北京及周边地区发生了一次强雷暴过程, 雷暴进入北京
226 之前在张家口附近已经形成了强对流单体, 进入北京后在有利的气象条件下很快
227 形成强爬线, 弓形结构明显。图 4 给出了这次雷暴过程整个生命史的总闪、地闪
228 和正地闪每 6 分钟闪电频数随时间的演变。这次雷暴过程一共探测到了 11902 次

229 闪电，以云闪为主，占总闪的约 72%，地闪占总闪的约 28%，这次雷暴过程正地
 230 闪偏少，仅占总地闪的约 5.3%。由图 4 可知，20:36 以后，闪电频数增加很快，
 231 于 20:54（北京当地时间，下文同）首次达到次峰值，闪电频数约为 898 次/6min，
 232 随后闪电活动略微减弱，但很快又活跃起来，于 21:12 再次到达最大值，总闪电
 233 频数分别为 927 次/6min，随后闪电活动逐渐减弱。总体趋势上，这次雷暴过程
 234 地闪的变化和总闪的变化一致，但是正地闪闪电频数在雷暴减弱阶段高于雷暴增
 235 强阶段。

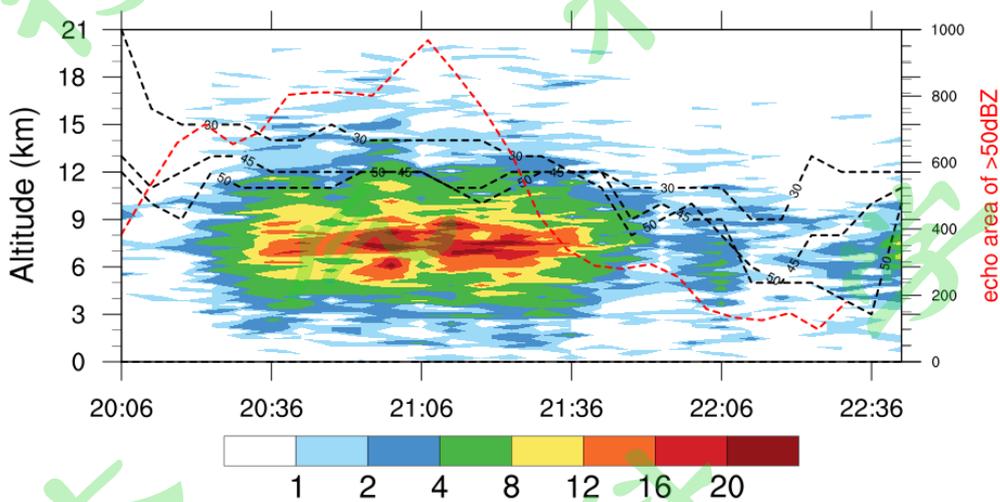


236
 237 图 4 总闪、地闪和正地闪频数的演变特征（横坐标：北京时间，左边纵坐
 238 标：总闪、地闪闪电频数；右边纵坐标：正地闪/地闪比例）

239 Fig. 4 Evolution characteristics of total flash, CG flash and positive CG (PCG)
 240 flash frequency (abscissa: Beijing time, left ordinate: total flash and CG flash
 241 frequency; right ordinate: PCG/CG flash ratio)

242 BLNET 能够探测确定闪电辐射源的三维空间信息，其高度信息有助于了解
 243 云中的电荷区域分布。图 5 给出了闪电辐射源密度随高度分布以及对应不同雷达
 244 回波面积随时间的变化。由图可知，这个雷暴过程，辐射源主要集中在 3-12km
 245 之间，其中辐射源高密度区集中在 5-9km，最大辐射源密度达到了 24 次/km。
 246 20:20 开始，辐射源密度开始逐渐增多，20:20-21:42 期间，5-9km 高度处出现了
 247 辐射源密度的高值区，最大辐射源密度达到 24 次/km。另外，由图中 30 dBZ、

248 45dBZ 和 50 dBZ 雷达回波顶高和 50 dBZ 面积随时间的变化可知，辐射源密度
 249 高值区和 30 dBZ、45dBZ 和 50 dBZ 雷达回波顶高具有很好的一致性，在辐射源
 250 密度高值区，对应的 30 dBZ 回波顶高位于 13-15km 之间，45dBZ 回波顶高位于
 251 10-13km 之间，50 dBZ 回波顶高位于 9-11km 之间。辐射源密度高值区和大于
 252 50dBZ 雷达回波面积的变化在前期也有一定的一致性，当辐射源密度值增多时，
 253 大于 50dBZ 雷达回波面积也增加；并在辐射源达到最大值时，大于 50dBZ 雷达
 254 回波面积也达到最大；但当 50dBZ 雷达回波面积快速下降时，辐射源密度和高
 255 度也开始缓慢下降，直到二者都达到一个很小的值。

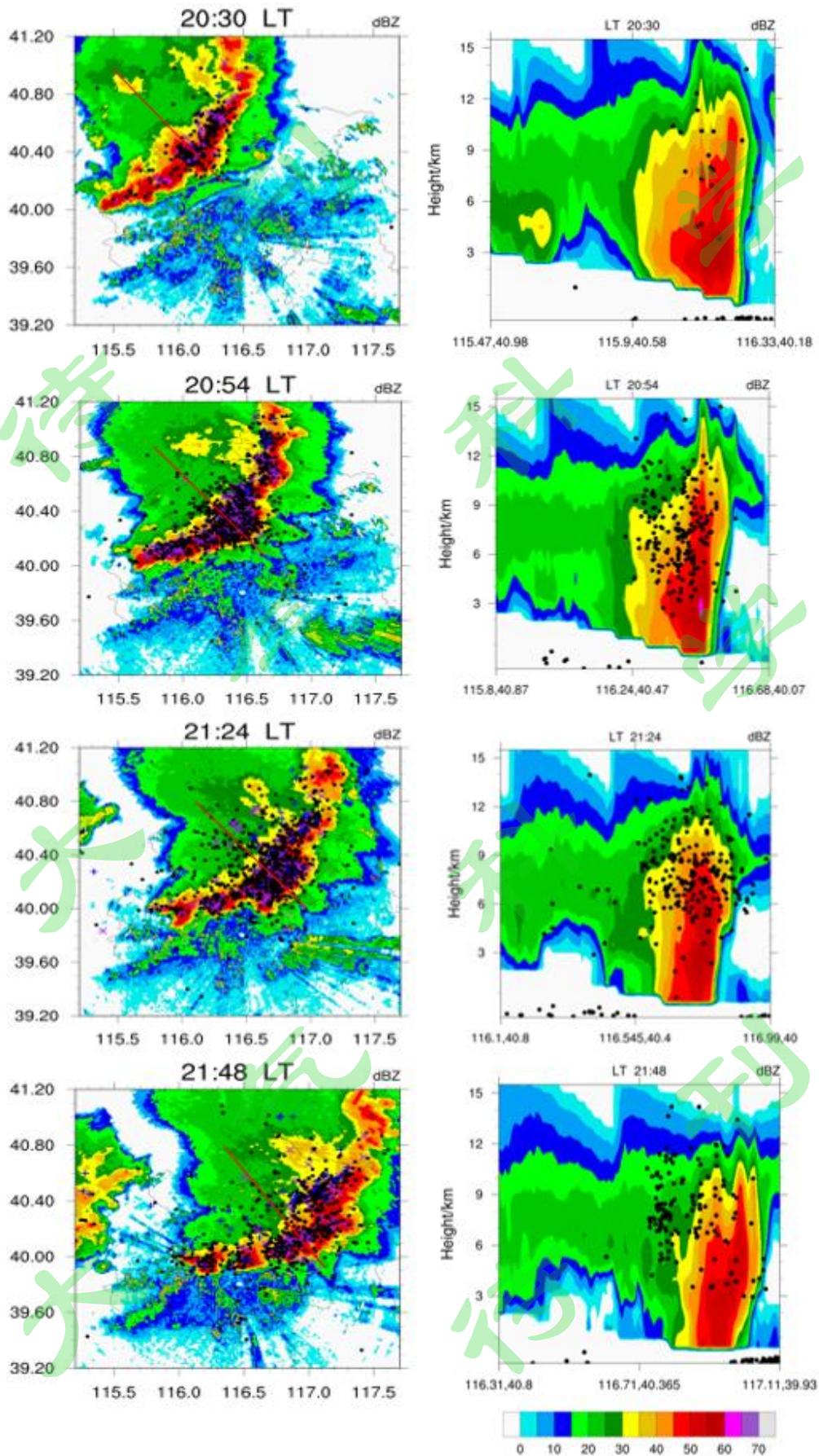


256
 257 图5 辐射源密度和不同强度雷达回波高度及大于50dBZ雷达面积随时间的变化
 258 (色标：辐射源密度，黑线，30dBZ、45dBZ、50Dbz，红线，单位：平方米，横
 259 坐标：北京时间，左边纵坐标：海拔高度，右边纵坐标：回波面积，单位：平
 260 方米)

261 Figure 5 Radar source density (color shaded), different intensity radar echo height
 262 (black line: 30dBZ, 45dBZ, 50dBZ) and area of reflectivity greater than 50dBZ (red
 263 line, unit: m^2) with time. Abscissa is the Beijing time.

264 图6 给出了整个雷暴过程从初始-成熟-消散三个阶段对应时段闪电辐射源和
 265 雷达回波的叠加。图中的黑点代表定位的闪电辐射源，彩色代表南苑 S 波段雷达
 266 的组合反射率因子。叠加的闪电辐射源为雷达回波对应时刻前 6 分钟的定位结
 267 果。由图可知，雷暴初始阶段 20:30，闪电辐射源比较少，只有少量的辐射源在

268 流区。随着雷暴发展成熟，闪电辐射源不断增多，且集中在回波强度为 45dBZ 左
269 右的对流塔区（20:54，21:24）。雷暴的消散阶段(21:48)，辐射源开始减少，高度
270 有所下降，虽然有辐射源出现在强回波区，但是大部分辐射源出现在层云区，这
271 与消散阶段发生的正地闪有关，通常这一阶段发生的正地闪由对流区始发，然后
272 向层云区发展，随后向下传播入地（Lu et al., 2013）。通过不同时刻的闪电辐射
273 源定位结果和雷达回波的对比发现，闪电辐射源和雷达回波区具有很好的一致性。
274 这不仅证明了升级后的 BLNET 具有三维定位能力，而且进一步证明了北京雷电
275 三维定位网定位结果的合理性。
276

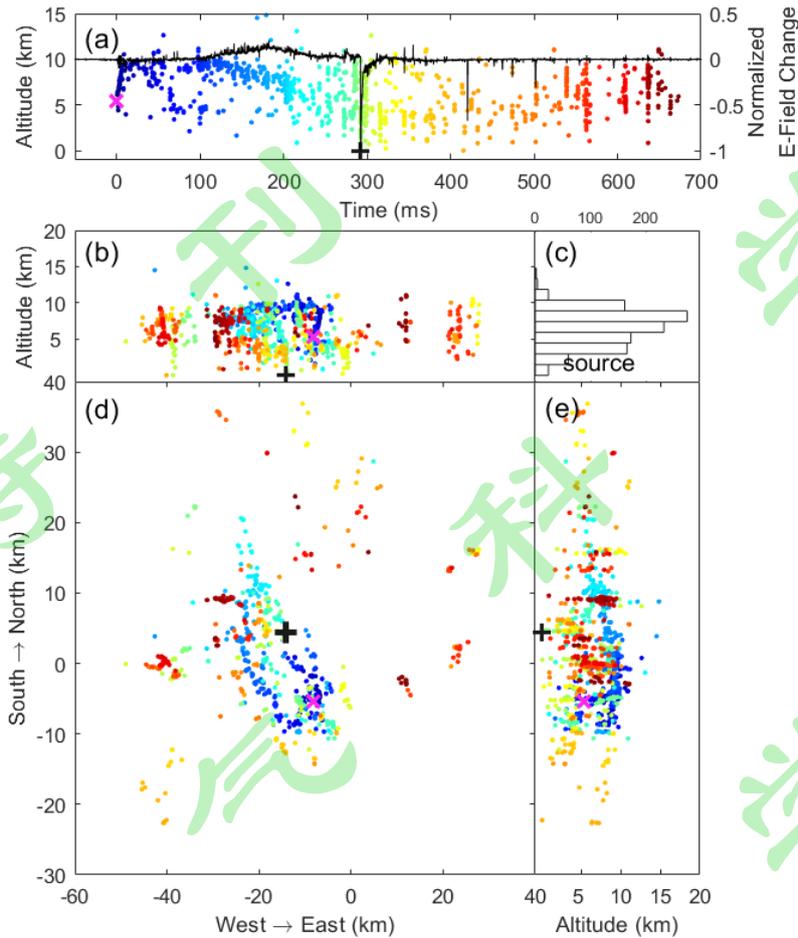


278 图6 雷暴过程从初始-成熟-消散三个阶段四个不同时刻闪电辐射源定位结果和
279 雷达回波的叠加 (20:30、20:54、21:24 和 21:48), 图中黑点代表辐射源

280 Figure 6 radar composite reflectivities and vertical cross sections along the
281 red line during the initial-mature-dissipated stage (at 20:30, 20:54, 21:24 and 21:48)
282 superimposed with lightning radiation sources, and black dots represent the radiation
283 source

284 4 通道可分辨的闪电放电过程的三维精细定位

285 BLNET不仅可以对整个雷暴过程的闪电辐射脉冲进行实时三维定位, 而且
286 可以事后对单次闪电放电进行精细定位, 图7 给出了一次正地闪放电通道的三维
287 时空演变。正地闪发生在2017年7月7日23时25分08秒, 是紧随上述飏线过程只后的
288 第二次线状对流系统所产生。这次正地闪只有一次回击, 持续时间约680ms,
289 发生在距离探测网络中心西南约16km处。此次闪电过程共探测到了1320个辐射
290 源。本次闪电起始放电表现出明显预击穿过程 (见图8), 对应闪电辐射源的始发
291 位置位于距地面约5.4km的高度, 然后通道向上发展, 根据电场变化判断, 为负
292 极性的先导通道, 发展到约10km后, 放电通道出现分叉, 分别朝测站西北方向发
293 展, 其中一个分叉沿着地表方向发展, 对应放电较弱的正极性通道。闪电起始
294 292ms后, 电场变化表现为正回击波形, 回击点的位置距离闪电起始位置的水平
295 距离约为11.7km。回击峰值后探测到从地面向上发展的辐射源, 对应于回击电流
296 自下而上的传播, 回击后云内放电强烈, 持续时间约380ms, 水平覆盖范围较广,
297 整个放电过程辐射源高度主要集中在3.7 km-9.6 km。图9 给出了这次正地闪和雷
298 达回波的叠加图, 可以看出正地闪的辐射源首先从强对流区始发, 初始击穿的负
299 先导垂直向上发展, 转为水平后倾斜往层状云区发展, 正地闪的回击点位于层状
300 云区。这个例子很好的说明了发生在层状云区的正地闪, 起始过程可以发生在对
301 流区, 通过水平发展的负先导通道到达层状云区, 负先导通道在层状云区的大范
302 围发展会中和大量的云中正电荷, 有利于“红色精灵”等中高层瞬态发光现象以
303 及地面高建筑上行闪电的发生。

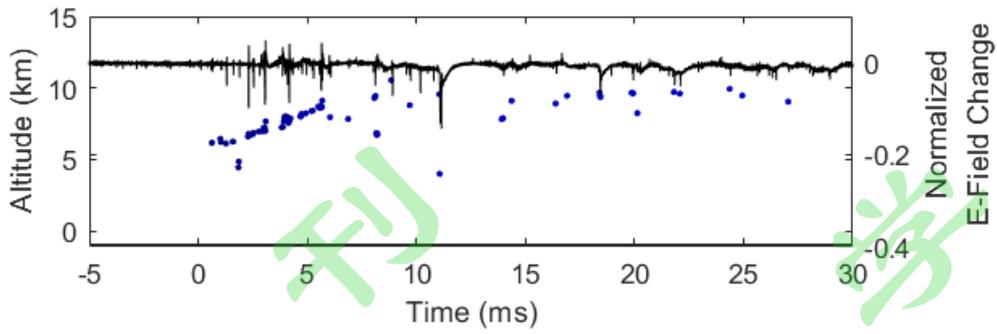


304

305 图 7 正地闪 20170707232508 的三维结构图，图中 (a) 闪电辐射源高度随时间
 306 的变化；(b) 表示辐射源在南北方向上的立面投影；(c) 辐射源发生数目随高
 307 度的分布；(d) 辐射源在平面的投影；(e) 辐射源在东西方向上的立面投影，
 308 图中"x"代表辐射源的始发高度，"+"代表正地闪打到地面对应的时刻。

309 Figure 7 3D channel structure mapping of positive CG 20170707232508. (a) the
 310 height of the lightning source versus time; (b) the projection of the radiation source in
 311 the North-South direction; (c) the number of radiation sources occurring with height
 312 distribution; (d) projection of the radiation source in the plane; (e) projection of the
 313 radiation source in the East-West direction, where "x" represents the originating
 314 height of the radiation source, and "+" represents the moment of PCG lightning
 315 flashing return stroke

316



317

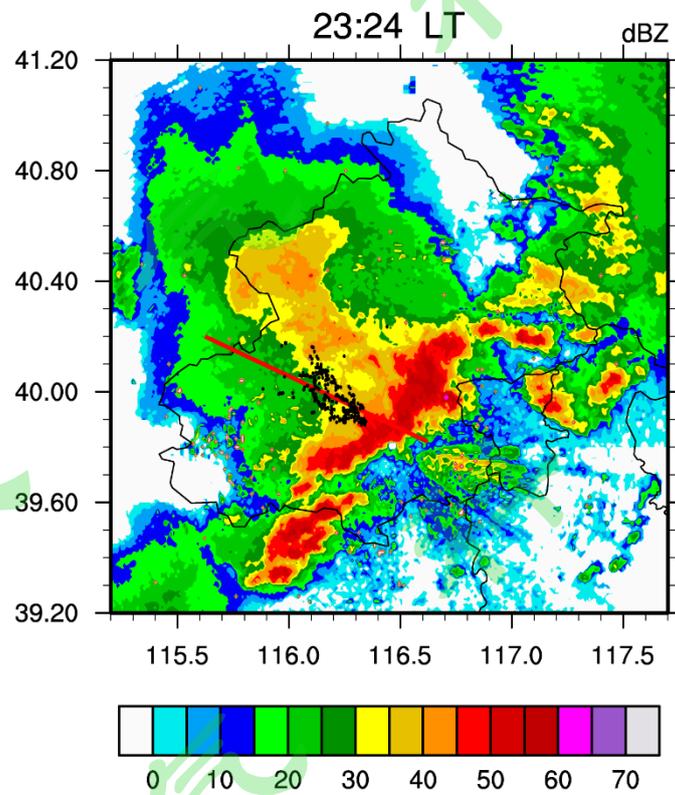
318

图 8 正地闪预击穿过程

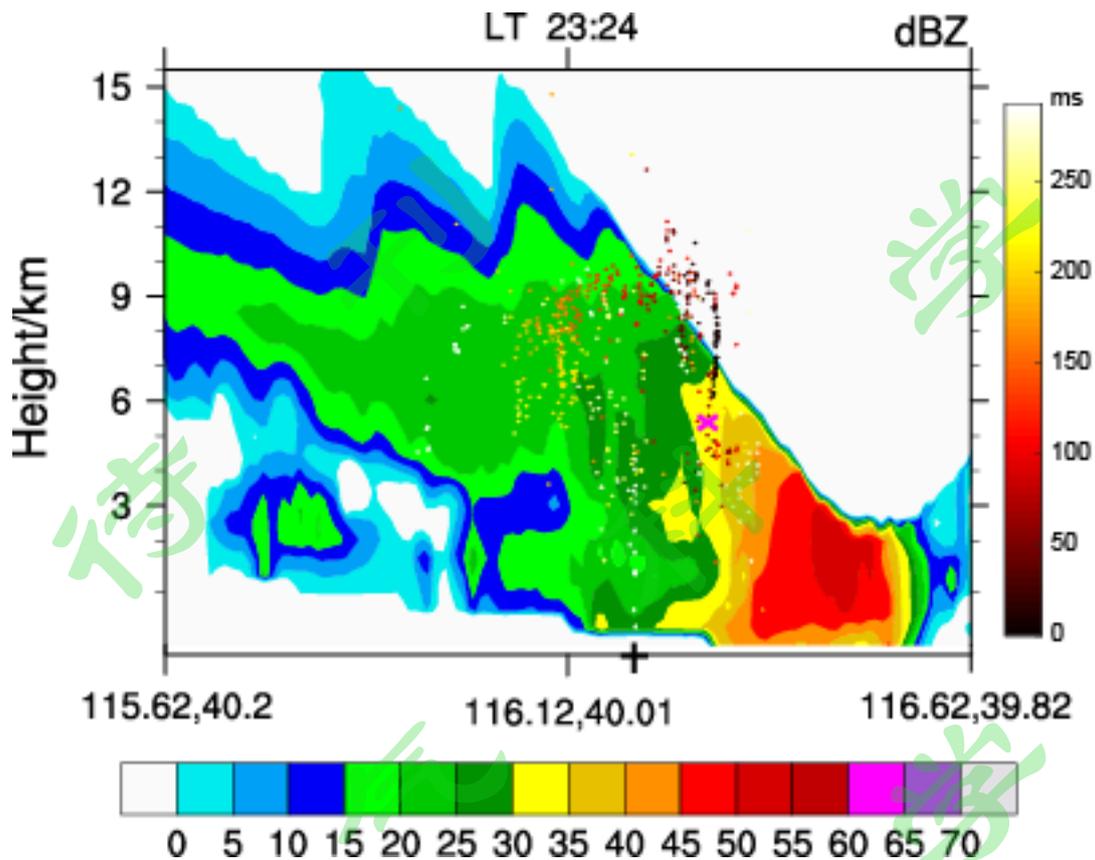
319

Figure 8 The preliminary breakdown process of the positive CG lightning flash

320



321



322

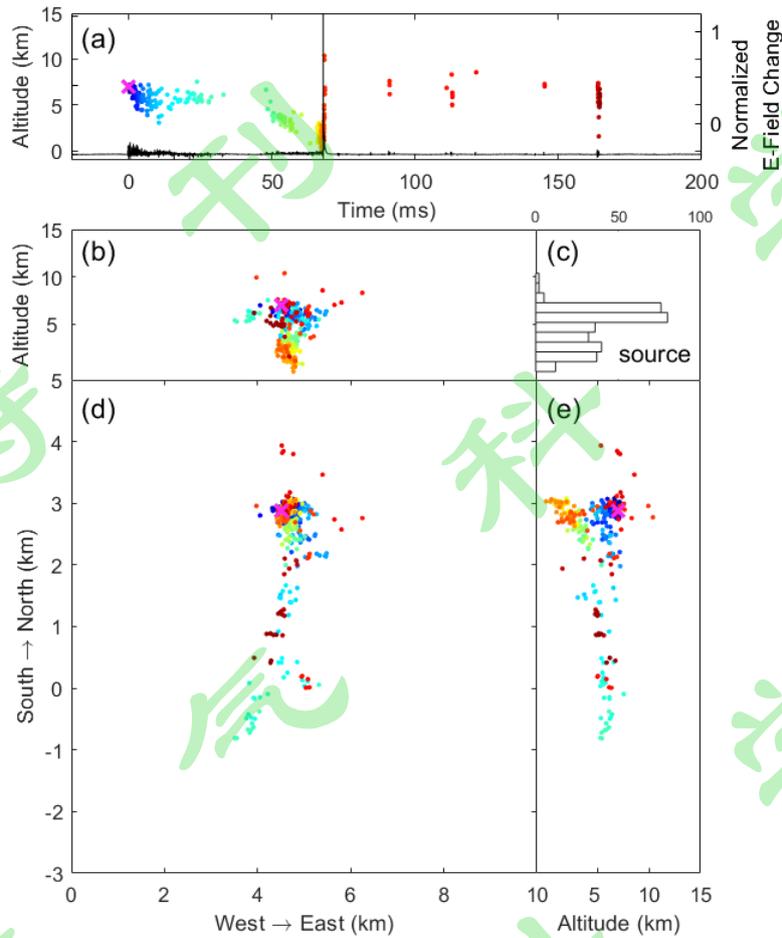
323 图9 正地闪的辐射源与雷达回波剖面的叠加（红线是雷达回波剖面的方向，右
324 边色标是闪电辐射源随时间的变化，底下的色标是雷达回波强度）

325 Figure 9 Superposition of the radiation source of the PCG flash and the radar echo
326 profile (The red line is the direction of the radar echo profile, the right color bar is the
327 change of the lightning radiation source over time, and the bottom color bar is the
328 radar echo intensity)

329 如图10 所示给出了2017年7月14日18时35分25秒的一次单回击负地闪的定位
330 结果，辐射源起始于较高高度，约7.1km，但持续时间相对较短，约175ms，随
331 后通道向地面偏南方向发展，闪电始发约37ms后通道短暂停止，此时向南发展的
332 闪电通道长度约为4km。约12ms后通道重新激发，负先导开始快速垂直向下发展，
333 随后电场波形表现为明显的负极性回击波形。回击后约90ms时间内，在4-8km内
334 探测到零星云内放电过程。

335 总之，从对整个爬线过程的三维定位结果与雷达资料的对比及闪电个例的定
336 位结果表明，BLNET不仅可以依据闪电辐射源的高度和发生频率来监测整个雷暴
337 生命史的发展演变过程，而且也可以精细描绘单次闪电放电通道结构的发展演变

338 过程。



339

340

图10 负地闪20170714183525的三维结构图

341

Figure 10 Same as Figure 7 but for negative CG 20170714183525

342

343 5 结论和讨论

344

本文对更新升级后的 BLNET 的测站布局、设备构成和探测能力等进行了
345 介绍，并利用蒙特卡罗模拟，对其定位误差进行了理论仿真，同时利用高塔闪
346 电对其实际定位误差进行了检验。利用 BLNET 实时三维定位资料，分析了
347 2017年7月7日一次爬线过程的闪电时空演化，并结合两个闪电个例进行了通
348 道可分辨的闪电三维精细定位，主要结论如下：

349

1、升级后的 BLNE 部分测站新增了磁场测量，具有云闪、地闪脉冲类型识
350 别和脉冲电流峰值估算等功能，BLNET 还发展了大容量基数据的本地化处理技
351 术，实现了闪电数据的实时定位及展示。这不仅满足了雷电预警预报业务的需求，

352 而且存留在子站的闪电原始波形信息可供后续的深入分析。

353 2、通过对一次强飏线雷暴过程整个生命史的闪电三维定位资料分析发现，
354 这次雷暴过程共观测到闪电 11902 次，以云闪为主，约占总闪的 72%，地闪占总
355 闪的 28%，正地闪仅占总地闪的 5%，雷暴成熟期最大闪电频数为 927 次/6min。
356 通过对比分析闪电辐射源位置 and 对应时刻的雷达回波，发现辐射源基本集中在强
357 回波范围内，特别是对流塔区域。辐射源高密度区集中在 5-9km，高闪电密度区
358 与 45dBZ、50dBZ 雷达回波顶高有很好的 consistency，与 50dBZ 强回波面积也有较好
359 的一致性。BLNET 不仅可以提供比较合理的辐射源二维信息，跟踪和监测雷暴
360 的发展演变过程，而且可以提供辐射源的高度信息，具有很好的三维定位能力，
361 与高分辨率天气雷达的反射率因子结合，可以提供雷暴天气系统研究的非常有用
362 的工具之一。

363 3、通过对一次正地闪和一次负地闪的精细定位发现，正地闪初始放电表现
364 出明显的预击穿过程，闪电辐射源的始发位置位于约 5.4km，然后通道向上发展，
365 为负极性的先导通道，向上发展的负极性通道发展到约 10km 左右，通道开始沿着
366 水平发展，随后，辐射源开始向下发展，对应放电的正极性通道，进而产生正回
367 击。负地闪辐射源起始于较高高度，约 7.1km，但持续时间相对较短，约 175ms，
368 闪电始发约 37ms 后通道短暂停止，之后约 12ms 后通道重新激发，负先导开始快速
369 垂直向下发展，随后电场波形表现为明显的负极性回击波形。对闪电个例放电过
370 程的定位结果表明，BLNET 可以通过事后分析，可以获得闪电放电通道结构的详
371 细信息。

372 本文的研究结果在很大程度上验证了更新升级后的 BLNET 对闪电辐射源三
373 位定位的可靠性，但也反映出了一些需进一步改进的问题。比如，虽然 BLNET
374 能很好的跟踪发生在探测范围内雷暴发展演变过程，但是对距离探测范围较远的
375 地区探测效率偏低。将来，打算进一步改进 BLNET 的运作，其通过增加更多的
376 测站和提高传感器的灵敏度，扩大 BLNET 的有效探测范围，采用更加先进的闪
377 电定位算法，以期得到更多更好的闪电三维定位结果。

378

379 **致谢：**感谢所有参与和建设北京闪电网（BLNET）的成员，感谢中国科学院
380 仪器设备功能开发技术创新项目的资助。

381

382

参考文献

383 曹冬杰, 郟秀书, 杨静, 等. 闪电初始放电阶段亚微秒电场变化波形特征[J].大气
384 科学,2011,35(4):645-656. Cao Dongjie,Qie Xiushu,Yangjing, et al.Analysis on
385 characteristics of sub-microsecond electric field change waveforms during the
386 initial stage of lightning discharge[J].Chinese Journal of Atmospheric
387 Science,2011,35(4):645-656.

388 樊艳峰, 陆高鹏, 蒋如斌, 等. 利用低频磁场天线遥感测量人工引雷中的初始连
389 续电流[J].大气科学,2017,41(5):1027-1036.Fan Yanfeng, Lu Gaopeng, Jiang
390 Rubin, et al. 2017. Application of low-frequency magnetic sensor for remote
391 measurement of the initial continuous current in rocket-triggering lightning [J].
392 Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 41 (5): 1027-1036,
393 doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1702.16248.

394 刘恒毅,董万胜,蔡力, 等. 一套双频段三维全闪电定位系统及其初步观测结
395 果 [J/OL] . 中国电机工程学报 . 2019-01-29 14:27:48,
396 <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2107.tm.20190125.1431.011.html>. LIU Hengyi,
397 DONG Wansheng, CAI Li, LI Liangfu, et al. Initial results of a dual band 3-D
398 lightning locating system[J]. Proceedings of the CSEE, 2019-01-29 14:27:48,
399 <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2107.tm.20190125.1431.011.html>

400 黎勋,郟秀书,刘昆, 等.2017.基于高时间分辨率快电场变化资料的北京地区地闪
401 回击统计特征[J].气候与环境研, 2017, 22 (2): 231-241. Li Xun, Qie
402 Xiushu, Liu Kun, et al. 2017. Characteristics of cloud-to-ground lightning return
403 strokes in Beijing based on high temporal resolution data of fast electric field
404 change [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 22 (2): 231-241,
405 doi: 10.3878/j.issn.1006-9585.2016.16007.

406 王宇,郟秀书,王东方, 等.北京闪电综合探测网(BLNET):网络构成与初步定位结

407 果[J].大气科学,2015,39(3):571-582. Wang Yu, Qie Xiushu, Wang Dongfang, et
408 al. 2015. Beijing Lightning NETwork (BLNET): Configuration and preliminary
409 results of lightning location [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in
410 Chinese), 39 (3): 571–582.

411 王东方, 郟秀书, 袁铁, 等. 利用快电场脉冲定位进行云闪初始放电过程的研究[J].
412 气象学报, 2009, 67(1):165–174. Dongfang, Qie Xiushu, Yuan Tie, et al. An
413 analysis on the initial stage of intracloud lightning with the location technique of
414 fast electric field change pulses[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2009. 67(1): 0165-74

415 王东方, 郟秀书, 袁善锋, 等. 北京地区的闪电时空分布特征及不同强度雷暴的贡
416 献 [J]. 大气科学, 2019, 6, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1904.19128. Wang
417 Dongfang, Qie Xiushu, Yuan Shanfeng, et al. Temporal and Spatial Distribution
418 Characteristics of Lightning in Beijing and Contribution of Thunderstorms with
419 Different Intensities[J]. Chinese Journal of Atmospheric Science, 2019, 6,
420 doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1904.19128.

421 Betz H D, Schmidt K, Laroche P, et al., LINET—An international lightning detection
422 network in Europe[J]. Atmospheric Research. 2009, 91: 564-573.

423 Biagi, C. J., K. L. Cummins, K. E. Kehoe, et al., National Lightning Detection
424 Network (NLDN) performance in southern Arizona, Texas, and Oklahoma in 2003-
425 2004[J]. J. Geophys. Res., 2007, 112, doi:10.1029/2006JD007341

426 Cummins, K. L., J. A. Cramer, C. J. Biagi, et al., The U.S. National Lightning
427 Detection Network: Post-upgrade status. Preprints, Second Conf. on
428 Meteorological Applications of Lightning Data, Atlanta, GA, Amer. Meteor.
429 Soc., 2006, 6.1.

430 Chronis T G, Anagnostou E N., Error analysis for a long-range lightning monitoring
431 network of ground-based receivers in Europe[J]. Journal of Geophysical Research.,
432 2003, 108(D24), DOI: 10.1029/2003JD003776.

433 Chronis T G, Anagnostou E N., Evaluation of a long-range lightning detection network
434 with receivers in Europe and Africa[J]. IEEE Transactions on Geoscience and
435 Remote Sensing. 2006, 44(4): 1504-1510.

436 Fan, X. P., Zhang, Y. J., Zheng, D., et al., A New Method of Three - Dimensional

437 Location for Low - frequency Electric Field Detection Array[J]. Journal of
438 Geophysical Research: Atmospheres, 2018, 123.
439 <https://doi.org/10.1029/2017JD028249>.

440 Krehbiel P. R., Thomas R. J., Rison. W., et al., Lightning mapping observations in
441 central Oklahoma[J]. EOS, 2000, 21-25

442 Hamlin TD. The New Mexico Tech Lightning Mapping Array[M]. PhD Thesis, 2004

443 Lagouvardos K, Kotroni V, Betz H D, et al., A comparison of lightning data provided
444 by ZEUS and LINET networks[J]. Natural Hazards and Earth System Sciences.
445 2009, 9:1713-1717.

446 Lu, G., R. Jiang, X. Qie, H. Zhang, Z. Sun, M. Liu, Z. Wang, and K. Liu. Burst of
447 intracloud current pulses during the initial continuous current of a rocket-triggered
448 lightning flash[J], Geophys. Res. Lett., 2014, 41, doi: 10.1002/2014GL062127.

449 Li, Y., G. Zhang, J. Wen, et al., Electrical structure of a Qinghai–Tibet Plateau
450 thunderstorm based on three-dimensional lightning mapping[J]. Atmos. Res.,
451 2013, 134, 137–149.

452 Li Y. J., G. S. Zhang, J. Wen, et al., Spatial and temporal evolution of a multi-cell
453 thunderstorm charge structure in coastal areas[J]. Chinese Journal of Geophysics
454 2012, 55(5):498-508.

455 Lhermitte R, Krehbiel P .Doppler radar and radio observations of thunderstorms[J].
456 IEEE Transactions on Geoscience Electronics., 1979,17:162-171.

457 Lu G., Steven A. Cummer, Jingbo Li, et al., Coordinated observations of sprites and in-
458 cloud lightning flash structure, J. Geophys. Res., Atmos., 2013, 118,
459 doi:10.1002/jgrd.50459.

460 Jerauld, J., V. A. Rakov, M. A. Uman, et al., An evaluation of the performance
461 characteristics of the U.S. National Lightning Detection Network in Florida Using
462 rocket-triggered lightning[J]. J. Geophys. Res.,
463 2005, 110, doi:10.1029/2005JD005924

464 Maier L, Lennon C, Britt T, et al., Lightning Detection and Ranging (LDAR) system

465 performance analysis, 1995 Int'l Conf. on Cloud Physics, Dallas, Texas. Amer.
466 Meteorol. Soc.

467 Poehler H, Lennon C. Lightning Detection and Ranging (LDAR) System Description &
468 Performance Objectives[J]. NASA Technical Memorandum, 1979, 74106:86

469 Rison, W., R. Thomas, P. Krehbiel, T, et al., A GPS-Based Three-Dimensional Lightning
470 Mapping System: Initial Observations in Central New Mexico[J]. Geophys. Res.
471 Lett., 1999, 26(23):3573-3576.

472 Sun Zhuling, Xiushu Qie, Mingyuan Liu, et al., Lightning VHF radiation location
473 system based on short-baseline TDOA technique - Validation in rocket-triggered
474 lightning[J]. Atmos. Res., 2013, 129-130, 58-66.

475 Srivastava A., Tian Y, Qie X, Wang D, et al., Performance assessment of Beijing
476 Lightning Network (BLNET) and Comparison with other lightning location
477 networks across Beijing[J]. Atmospheric Research, 2017, 197, 76-83.

478 Shao X, Stanley M, Regan A, et al., Total Lightning Observations with the New and
479 Improved Los Alamos Sferic Array (LASA) [J]. Journal of Atmospheric and
480 Oceanic Technology., 2006, 23(10):1273-1287.

481 Thomas R, Krehbiel P, Rison W, et al., Accuracy of the lightning mapping array[J]. J.
482 Geophys. Res., 2004, 109:D14207, doi:10.1029/2004JD004549, 002004

483 Uman M, Beasley W, Tiller J, et al., An unusual lightning flash at Kennedy Space
484 Center[J]. Science., 1978, 201:9-16.

485 Uman, M. A., D. K. McLain, and E. P. Krider, The electromagnetic radiation from a
486 finite antenna[J]. Am. J. Phys., 1975, 43, 33-38.

487 Wang Yu, Xiushu Qie, Dongfang Wang, et al., Beijing Lightning Network (BLNET) and
488 the observation on preliminary breakdown processes[J]. Atmospheric Research,
489 2016, 171:121-132.

490 Wu, B., G. Zhang, J. Wen, T. Zhang, et al., Correlation analysis between initial
491 preliminary breakdown process, the characteristic of radiation pulse, and the
492 charge structure on the Qinghai-Tibetan Plateau[J]. J. Geophys. Res. Atmos., 2016,
493 121, 12, 434-459, doi:10.1002/2016JD025281.

494 Zhang G S, Wang Y H, Qie X S, et al., Using lightning locating system based on time-

495 of-arrival technique to study three-dimensional lightning discharge processes[J].
496 Sci China Earth Sci, 2010, 53:591-602, doi: 10.1007/s11430-009-0116-x.
497 Zhang H., G. Lu, X. Qie, et al., Locating narrow bipolar events with single-station
498 measurement of low-frequency magnetic fields[J]. J. Atmos. Sol. Terr. Phy.,
499 2016,143-144, 88–101.

第

科

刊

第

十

卷

期

刊

第

十