

中国气象学会第十七届防雷减灾论坛（泉州）



混合长基线天电阵列

集科研/应用于一体的新一代平台

祝宝友，马明，陆高鹏，刘非凡，吕伟涛，吕凡超

中国科学技术大学地球和空间科学学院

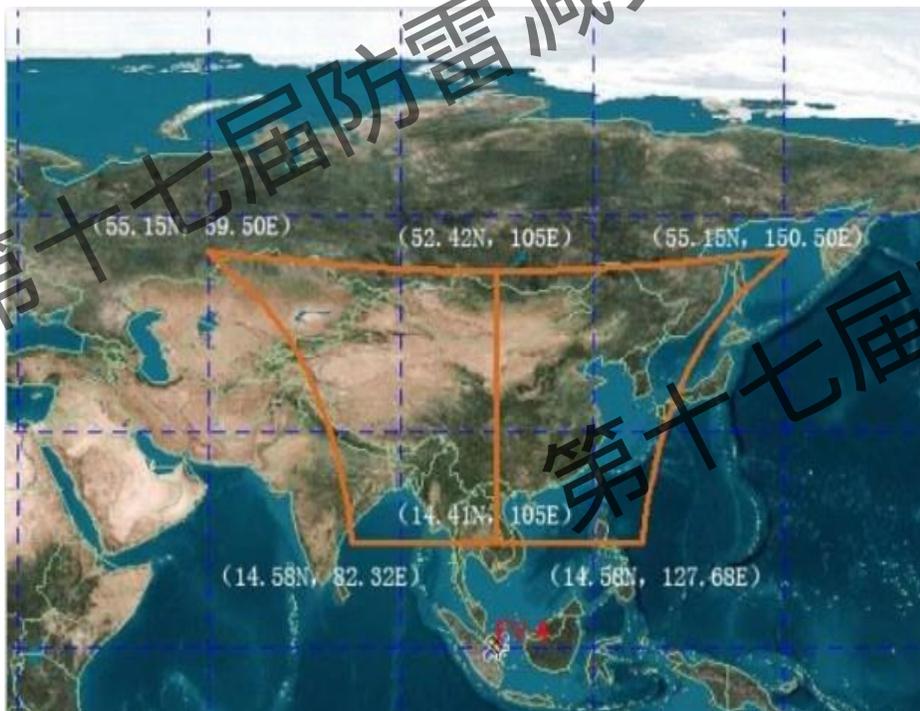
中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室

南京气科技创新研究院

2023年10月18日

风云卫星闪电成像仪 (LMI)

闪电成像仪是全球第一批两颗静止气象卫星闪电成像仪之一，对观测区域内包括云闪、云间闪、云-地闪在内的总闪电进行凝视观测，实现对雷暴系统的实时、连续监测和跟踪，为强对流天气监测、民航、铁路、电力等行业安全保障等提供服务。



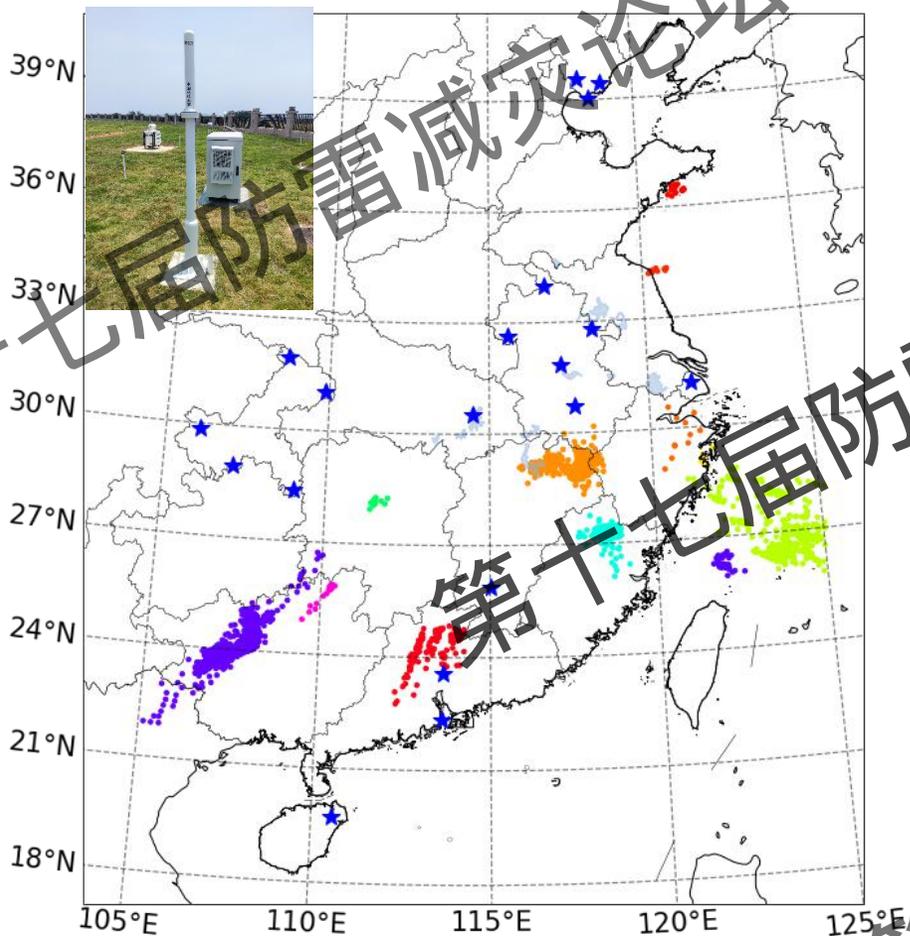
搭载卫星	FY-4A
重量	65kg
尺寸	528mm(长) × 346mm (宽) × 1032mm (高)
CCD阵列	400 × 600单元
成像速率	500帧/秒
中心波长	777.4nm
带宽	1nm
空间分辨率	7.8km@星下点
总视场角	4.98° (南北) × 7.41° (东西)
闪电探测率	90%
虚警率	10%

实时、大范围、高精度闪电监测

混合长基线天电阵列 (JASA)

JASA: 科大地空学院与气科院灾害天气国家重点实验室共同打造

- 原始闪电波形无缝采集和高精度授时技术
- 独创的混合基线组网技术和GPU实时定位



雷电物理

地基验证

科学研究
应用平台

强对流
监测平台

低电离层
监测

汇报提纲 | CONTENTS

1

系统简介

2

地基验证

3

科学研究

4

潜在应用

混合长基线天电阵列20+历史演进

率先研发~50ns精度时间同步技术和大容量信号采集技术。上海气象局滨海雷达站

闪电信号电离层反射波识别，江淮地区6站电离层探测试验网。安徽地震局

江淮地区长基线+外埠超长基线混合网。安徽民航气象台

福建海峡5站业务观测子网和科研观测网。福建气象局

~1998

国内首次实现单站闪电定位。获全国机场以及气象部门50台套以上试用

~2004



~2011



三站GPS时间同步闪电到达时间差定位试验网。大兴安岭林业公司森林技术推广服务站

2015



河北花博会气象服务示范，雷暴/强对流4站业务观测网。唐山气象局

2016



2019



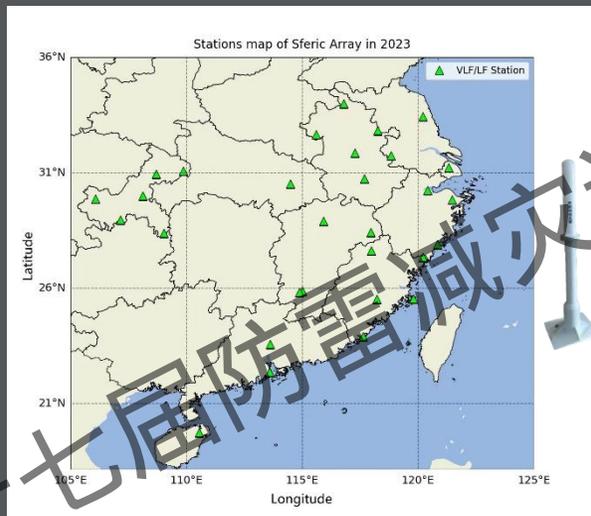
西南地区强对流6站业务观测子网和科研观测网。重庆市气象局

2023



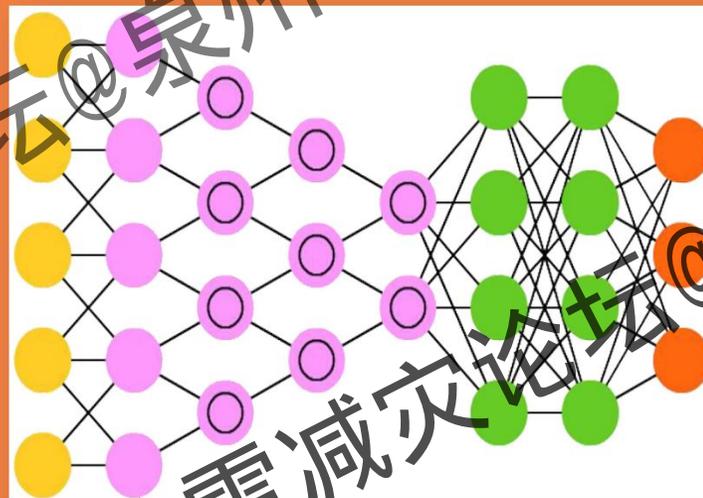
第十七届防雷减灾论坛@泉州

混合长基线天电阵列特色



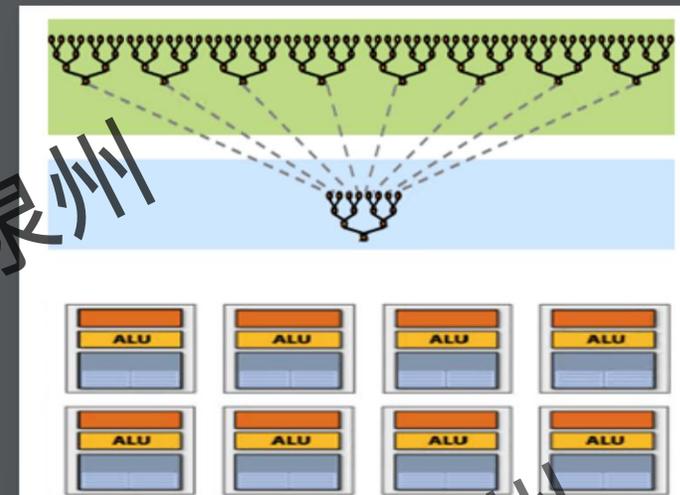
01 独特的长基线+超长基线组网技术

- 利用自主发展的电离层反射波识别技术，实现远距离闪电到达时间的精确测量，~200km+~1000km混合基线以较少测站实现大范围强对流和闪电活动探测覆盖



02 独创的神经网络闪电事件识别技术

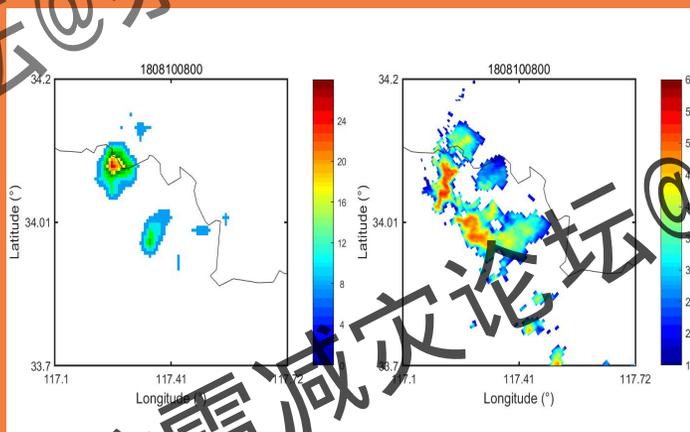
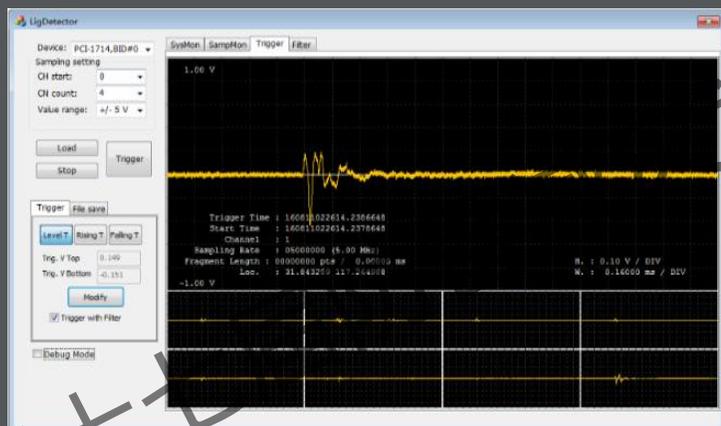
- 借助人工智能技术实现基于时域波形的闪电放电事件的高效和快速识别，



03 独创的GPU定位技术

- 全国只有几个雷暴同时活动时，多核CPU可以胜任实时定位运算需求；全国同时有几十个雷暴在活动时，运用独创的GPU定位算法胜任实时定位需求！

混合长基线天电阵列特色



04 独创的闪电原始波形存档技术

- 原始波形的实时存档将是新一代闪电定位系统的标配功能，使得地面闪电定位资料有着匹敌卫星0级资料的优势。存档原始数据也可用于事后验证目的。

05 对流核实实时追踪和趋势演进预测

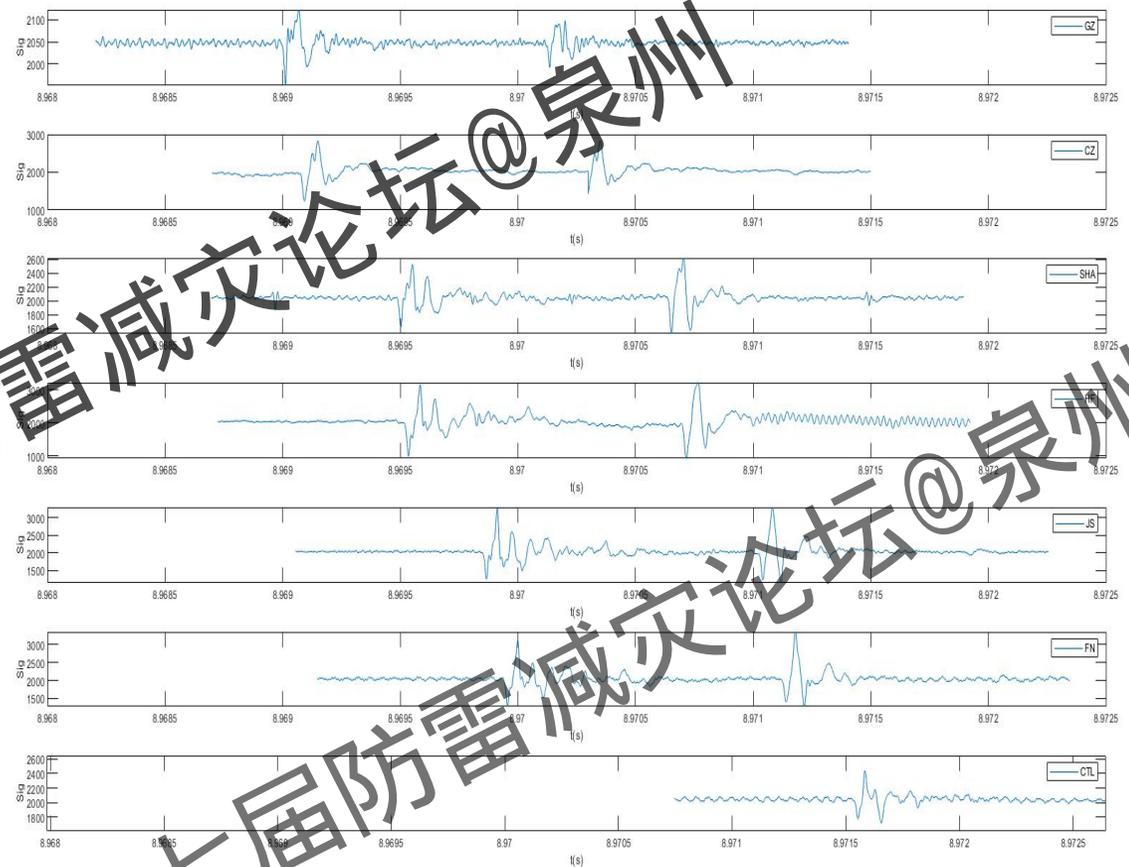
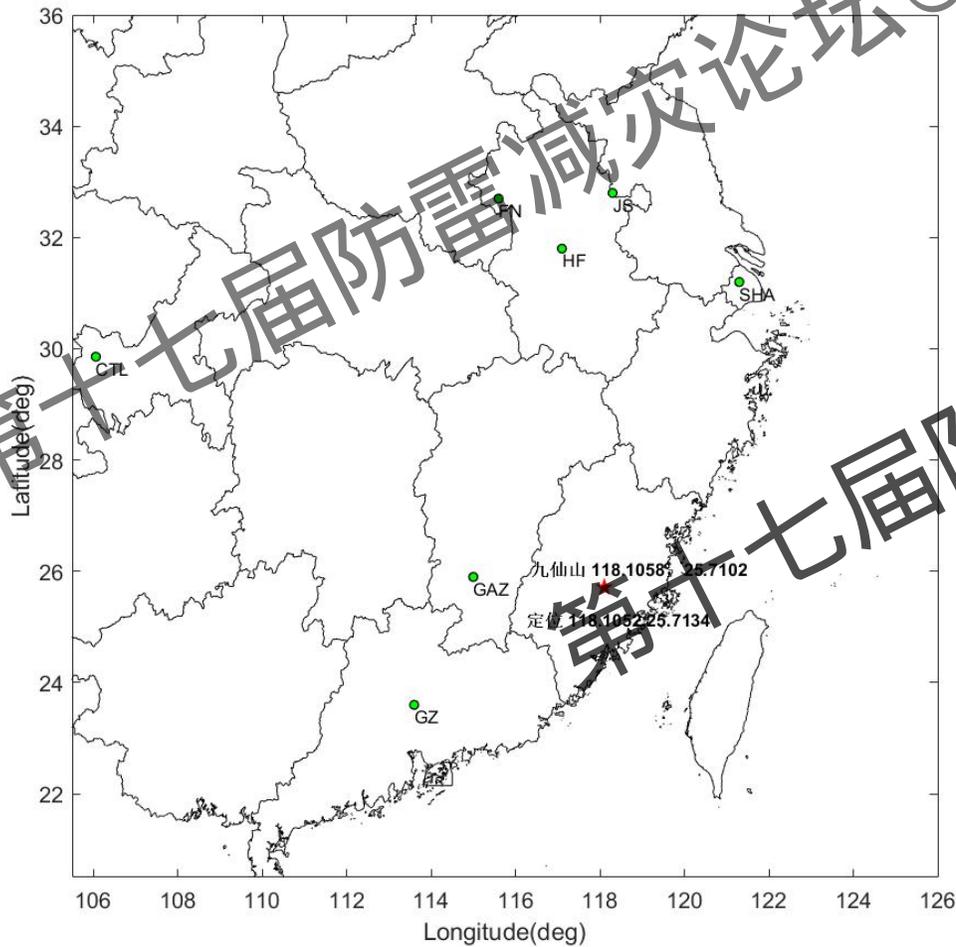
- 基于雷暴物理学的闪电定位资料的科学解释，实时追踪分析对流核的时空演变

06 灵活的布站方式

- 采用混合基线组网技术，借助高精度北斗/GPS时间同步技术，实现大范围灵活布站

混合长基线组网技术定位性能检验

5次人工引雷和一次自然接闪定位精度优于1km (200-800m)



基于陆上探测子站的1000km海面雷电活动实时监测

混合长基线天电阵列国际影响力

➤ 基于先进闪电阵列优异的大范围和不间断数据采集能力，与国内外一些重大研究项目开展数据层面的合作，为空基观测雷暴源事件提供高质量的同步雷暴放电细节数据。

◆ 被欧空局纳为亚太地区地基验证平台



Proposal for access to data at the ASIM Science Data Center

Short project name: <Short name of project>
Possible associations of narrow bipolar events with transient luminous events
Lead Investigator: Dr. Zhu baoyou phone: +86-13855113065
email: zhuby@ustc.edu.cn

Lead Institution: <Name of lead investigator's research institution>
School of Earth and Space Sciences, University of Science and Technology of China
Address: <Full address of lead investigator's research institution>
96 Jinzhai Road, Hefei, P.R. China, 230026

Members of the research team <name, email address, institution for each member>
Dr. Liu Feifan feifan@ustc.edu.cn, School of Earth and Space Sciences, University of China



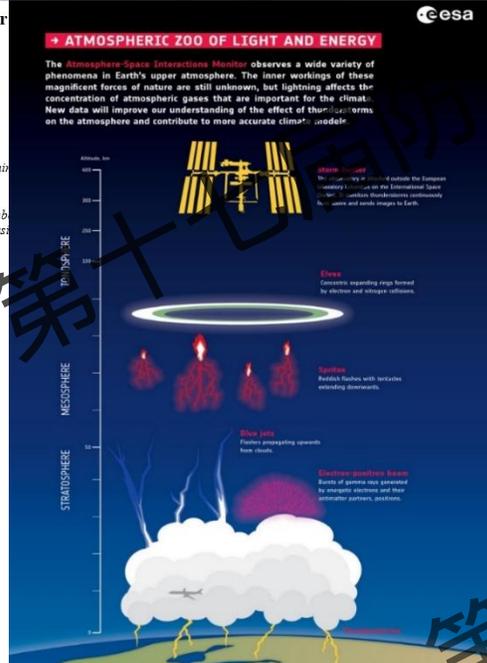
大气-空间相互作用监测计划 (ASIM)

◆ 为国内外研究团队提供高质量研究数据

西班牙、丹麦、香港和大气所等课题组利用本平台数据，近5年在GRL和JGR等高水平国际期刊发表SCI论文20余篇

◆ 国内外重大研究项目开展联合观测

- 欧洲ESA大气-空间相互作用监测项目 (ASIM)
- 美国NASA伽马射线爆监测器 (GBM-FERMI)
- 中国“慧眼”硬X射线调制望远镜 (HXMT)
- 中国“怀柔一号”引力波暴高能电磁对应体全天监测器 (GECAM)
- 中国气象科学研究院华南季风/台风降水协调观测实验



汇报提纲 | CONTENTS

1

系统简介

2

地基验证

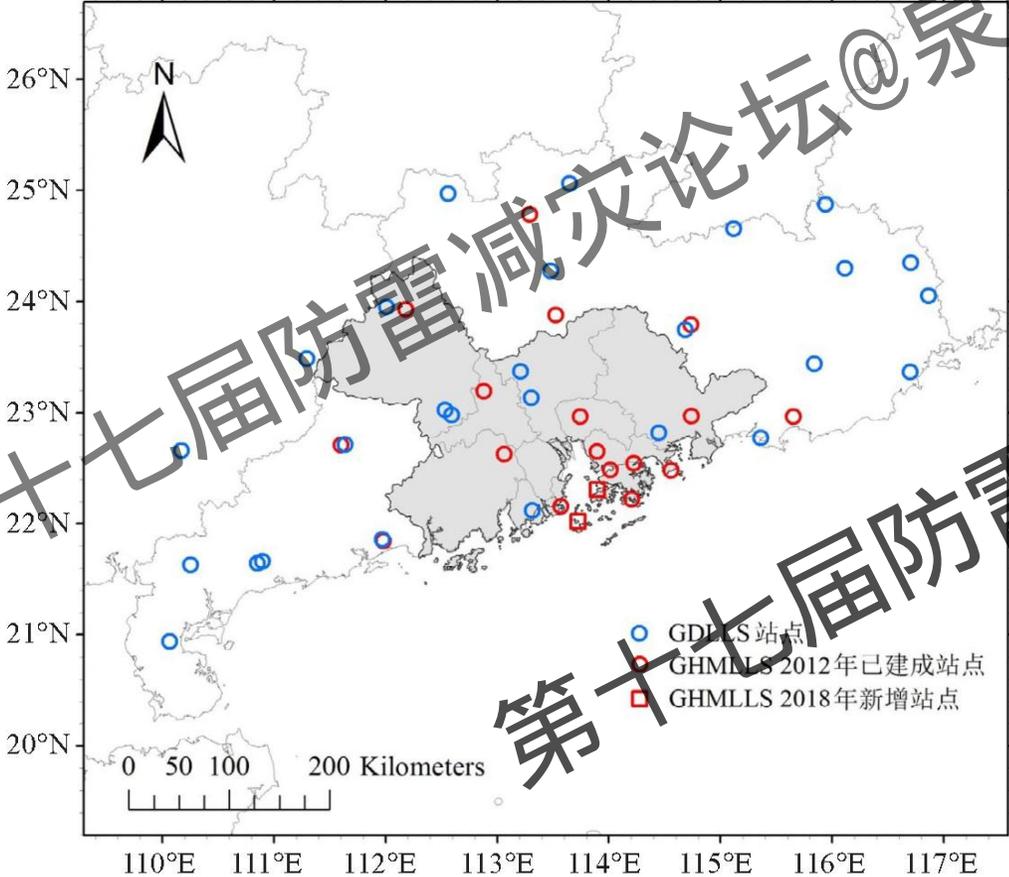
3

科学研究

4

潜在应用

检验粤港澳闪电定位系统探测效率



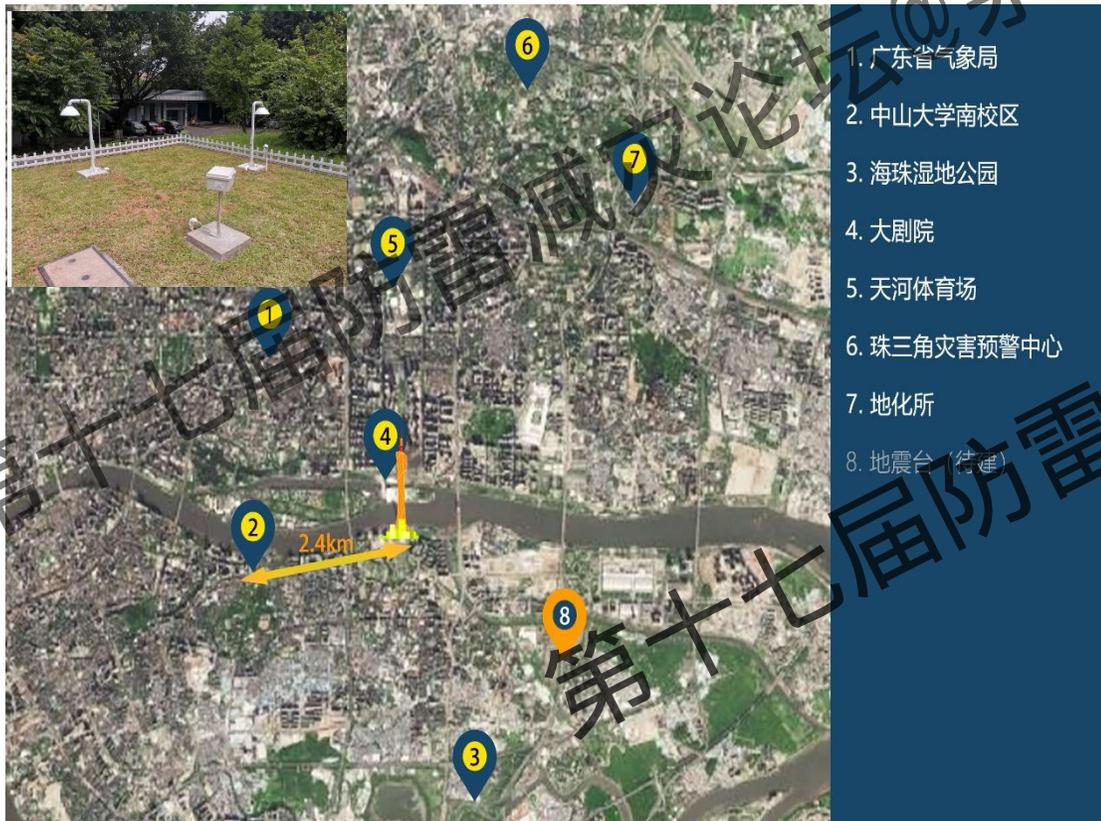
广州高建筑物雷击资料, CHMLLS回击探测效率93% (陈绿文等,应用气象学报, 2020)

影响探测效率的可能因素:

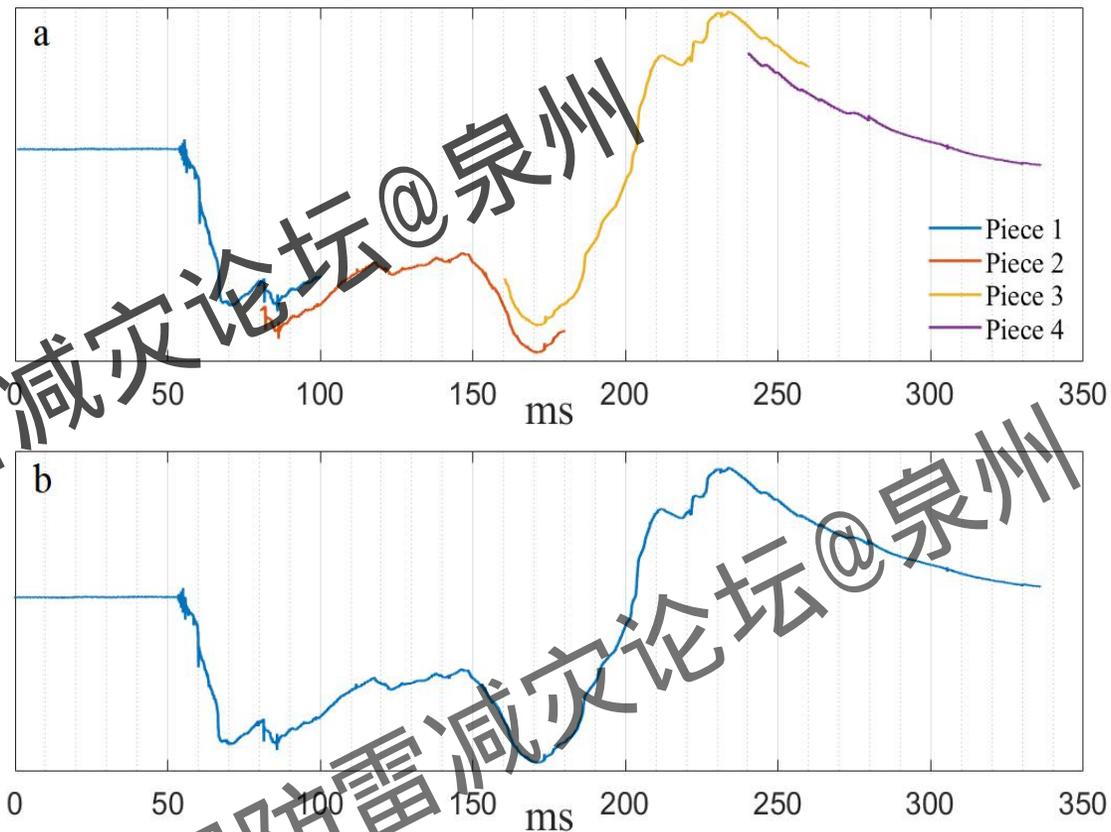
- 1. 强度太弱, 探测子站数目少
- 2. 系统分类算法识别失败
- 3. 系统定位算法匹配失败
- 4. 系统定位算法定位失败

检验粤港澳闪电定位系统探测效率

局地探测阵列不间断记录提供闪电事件真解



广州地面变化观测阵列

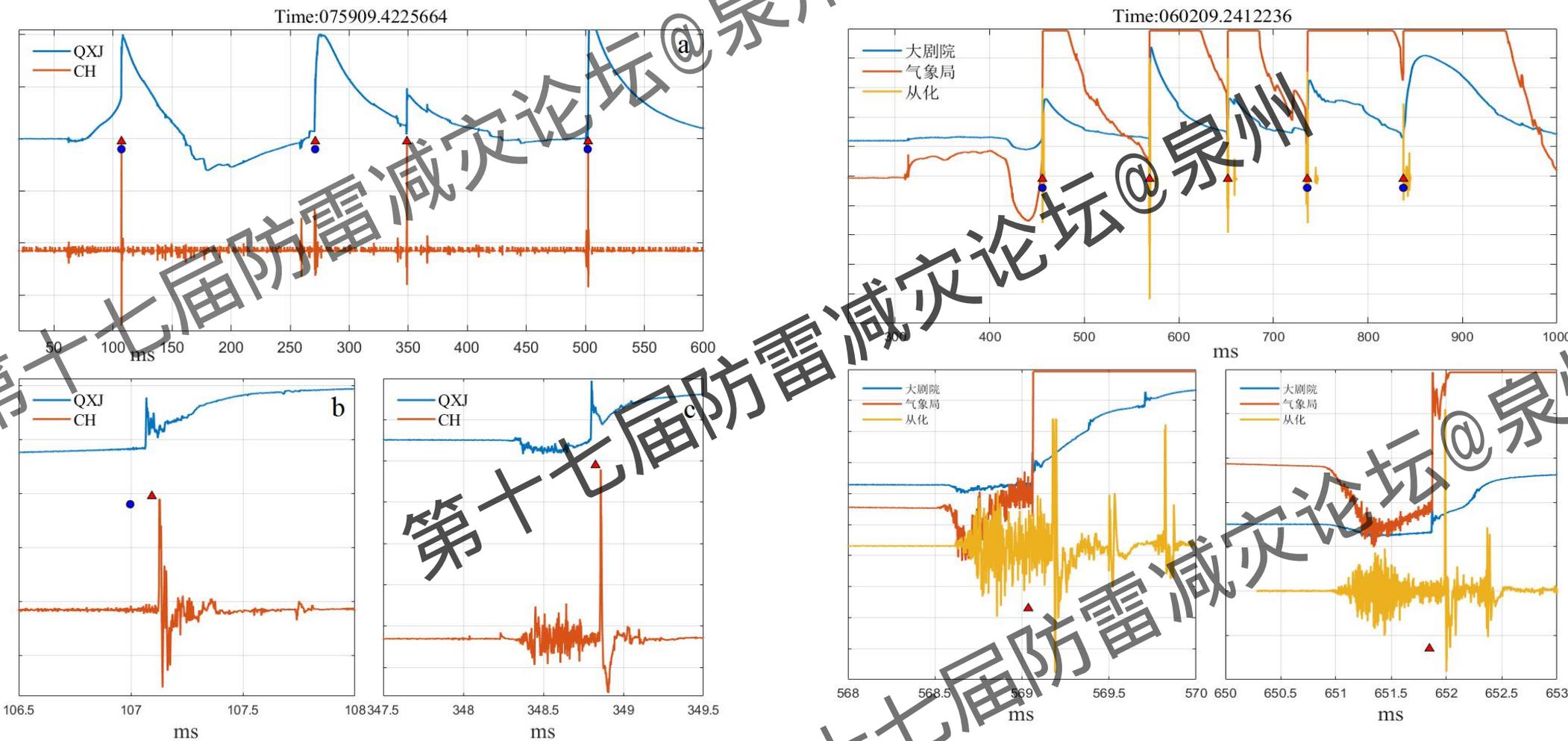


不间断采样技术拼接完整放电波形

第十七届防雷减灾论坛@泉州

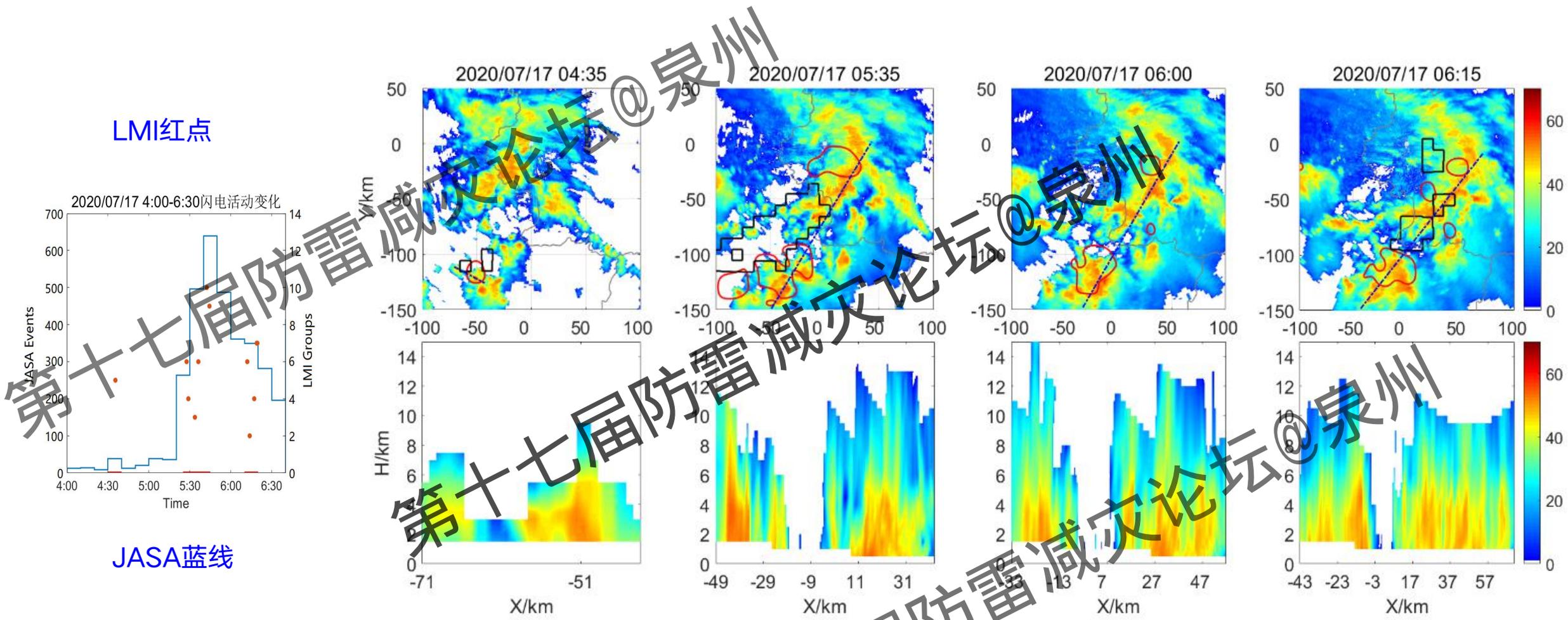
检验粤港澳闪电定位系统探测效率

JASA从化站波形：不能识别复杂地闪回击波形是影响回击探测效率的主要因素



805次地闪回击，从化站全部探测到波形，CHMLLS成功定位750例（94%）（刘国进，2021）

JASA与LMI的个例比较



LMI光学事件与JASA电学事件 (万泽润, 2021)

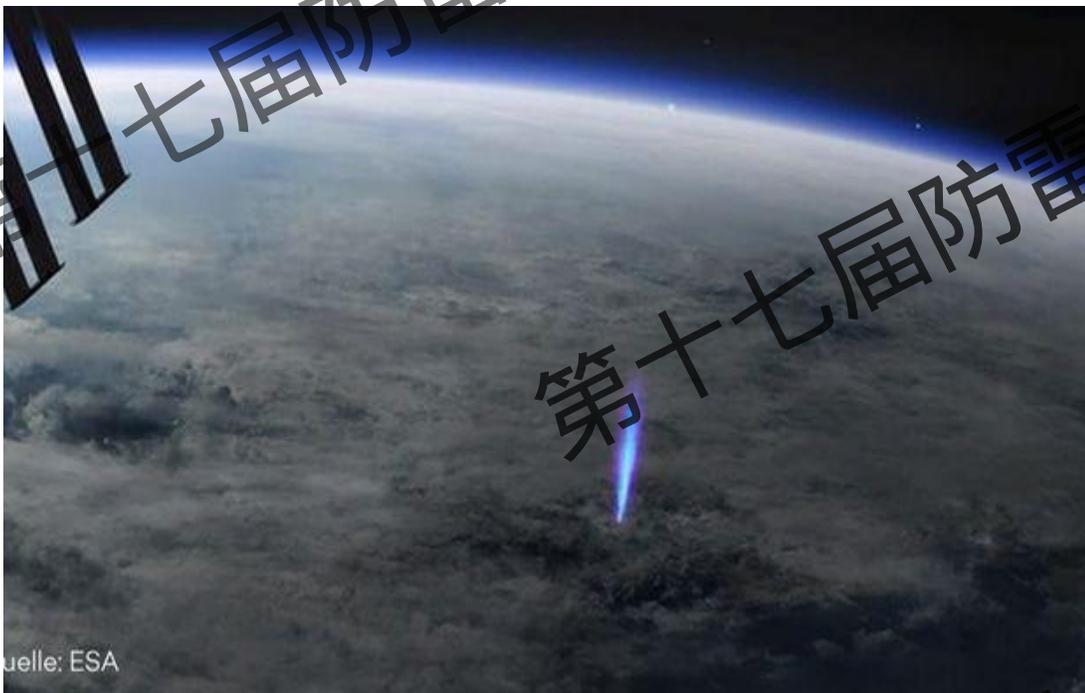
LMI黑框, JASA红框

第十七届防雷减灾论坛@泉州

JASA与空基BLUE discharges



- 中国台湾福卫二号中高层放电成像仪 (ISUAL)
- 欧空局国际空间站大气空间相互作用 (ASIM)



- 蓝色放电的云内始发过程是什么?
- 雷暴云上层放电是什么关系?
- 缺乏地基的验证资料

JASA与空基BLUE discharges

云顶蓝色放电与强对流云内NBE时间关联

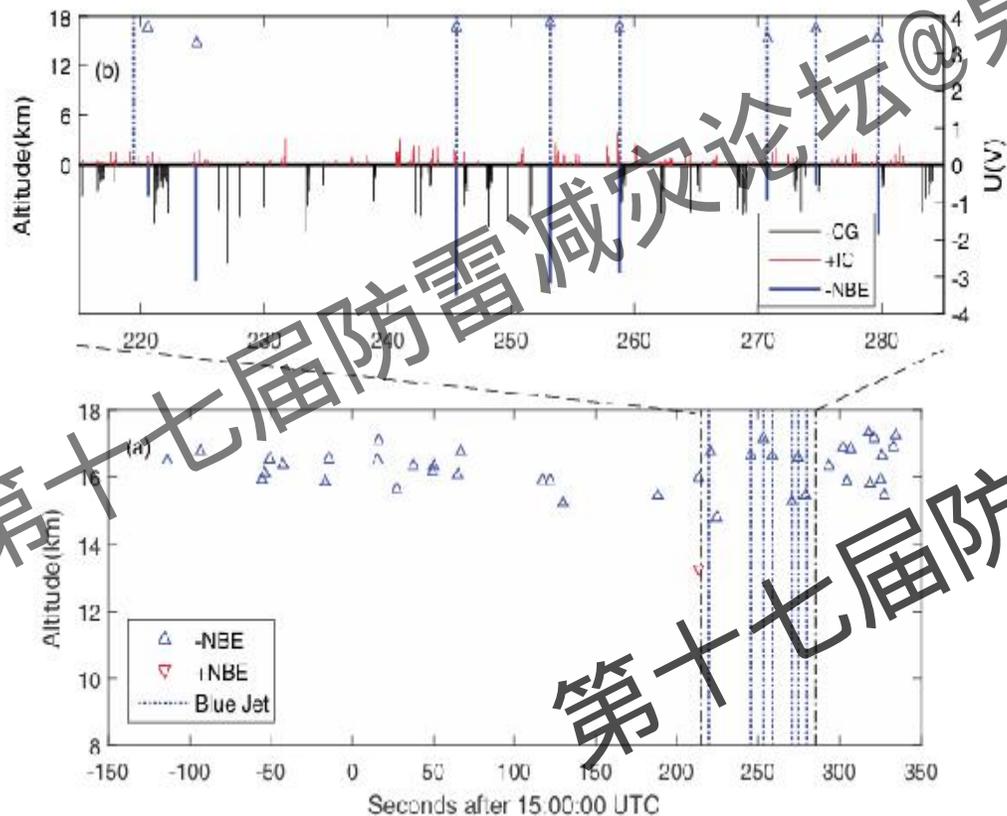


Table 1

Detailed Information of Observed Blue Discharges With Negative Narrow Bipolar Events (NBEs)

Thunderstorm	Blue discharges ISUAL trigger time (UTC)	NBE_Lon	NBE_Lat	Time difference with NBEs	NBE_Height	
Hangzhou Bay	2014/09/12 15:11:40.816	120.90	29.82	-0.4 ms	17.8 km	
	2014/09/12 15:13:06.179	120.95	29.86	-0.2 ms	17.7 km	
	2014/09/12 15:13:15.485	120.93	29.88	-0.3 ms	17.1 km	
	2014/09/12 15:13:35.563	120.91	29.86	-0.2 ms	17.6 km	
	2014/09/12 15:13:36.557	120.94	29.87	-0.1 ms	16.9 km	
	2014/09/12 15:13:38.907	120.93	29.84	0.1 ms	17.2 km	
	Jinhuaihu	2012/08/19 15:03:39.453	NULL	NULL	NULL	NULL
		2012/08/19 15:04:05.543	120.12	31.52	0.2 ms	16.6 km
		2012/08/19 15:04:13.162	120.15	31.51	-0.2 ms	17.1 km
		2012/08/19 15:04:18.795	120.13	31.59	-0.6 ms	16.6 km
	2012/08/19 15:04:30.724	120.16	31.58	0.1 ms	15.8 km	
	2012/08/19 15:04:34.628	120.10	31.57	0.3 ms	15.9 km	
	2012/08/19 15:04:39.684	120.12	31.52	0.8 ms	15.4 km	

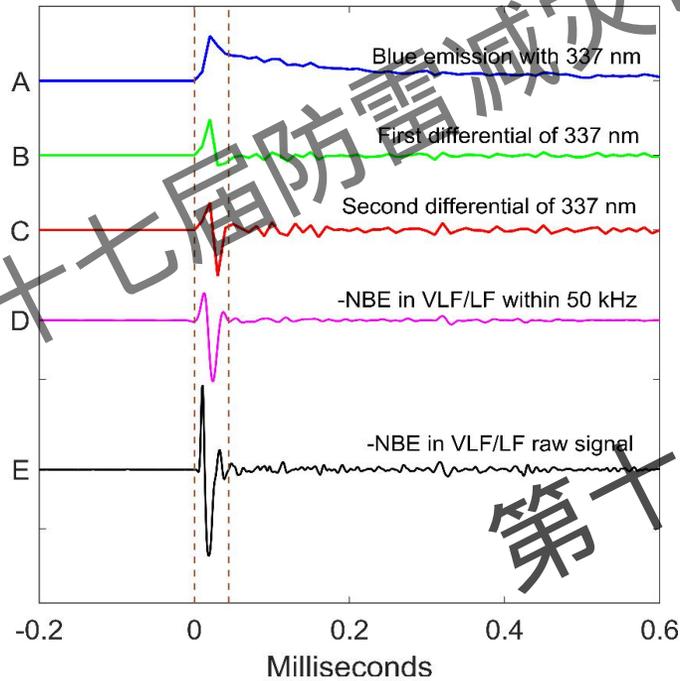
Abbreviations: ISUAL, imager of sprites and upper atmospheric lightning; NBEs, narrow bipolar events.

ISUAL蓝色放电与NBE (Liu et al.,GRL(2017),JGR(2021), RS(2022))

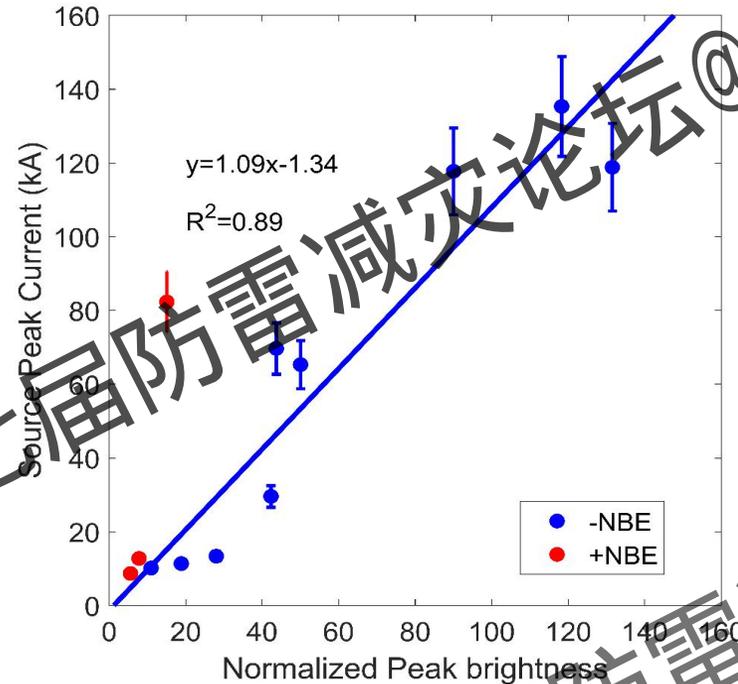
JASA与空基BLUE discharges

云顶蓝色放电与云内上层放电物理同源首次给出直接证据

波形相关性



强度相关性



ASIM蓝色放电与电学NBE (Liu et al., Nat COMM(2021))

汇报提纲 | CONTENTS

1

系统简介

2

地基验证

3

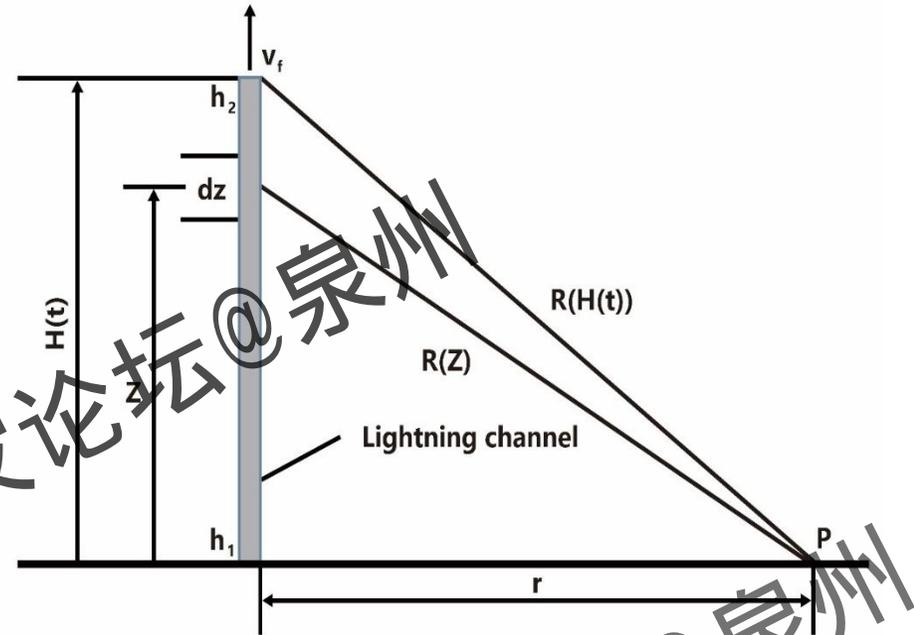
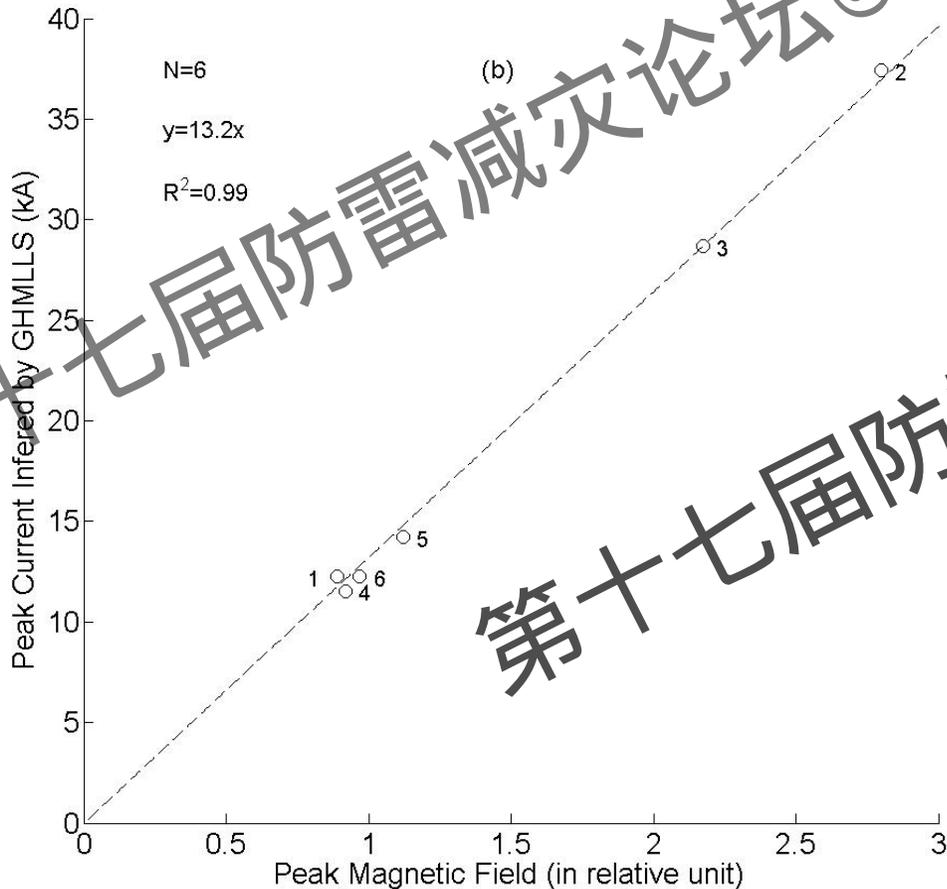
科学研究

4

潜在应用

JASA评估闪电电磁脉冲传播衰减

闪电定位系统报告放电电流原理



$$E(r, t) \approx \frac{1}{2\pi c^2 \epsilon_0 r} \int_{h_1}^{h_2} \frac{dl(z', t)}{dt} dz'$$

$$E_p = \frac{vI_p}{2\pi c^2 \epsilon_0 r} = k \frac{I_p}{r} \quad (\text{不考虑传播衰减})$$

远场辐射场强度与放电电流线性关系
当存在传播衰减时，这种估计的电流强度偏小，因此需要对传播衰减进行评估订正

GHMILLS-PEAK和MAG-PEAK呈线性关系 (陈绿文)

JASA评估闪电电磁脉冲传播衰减

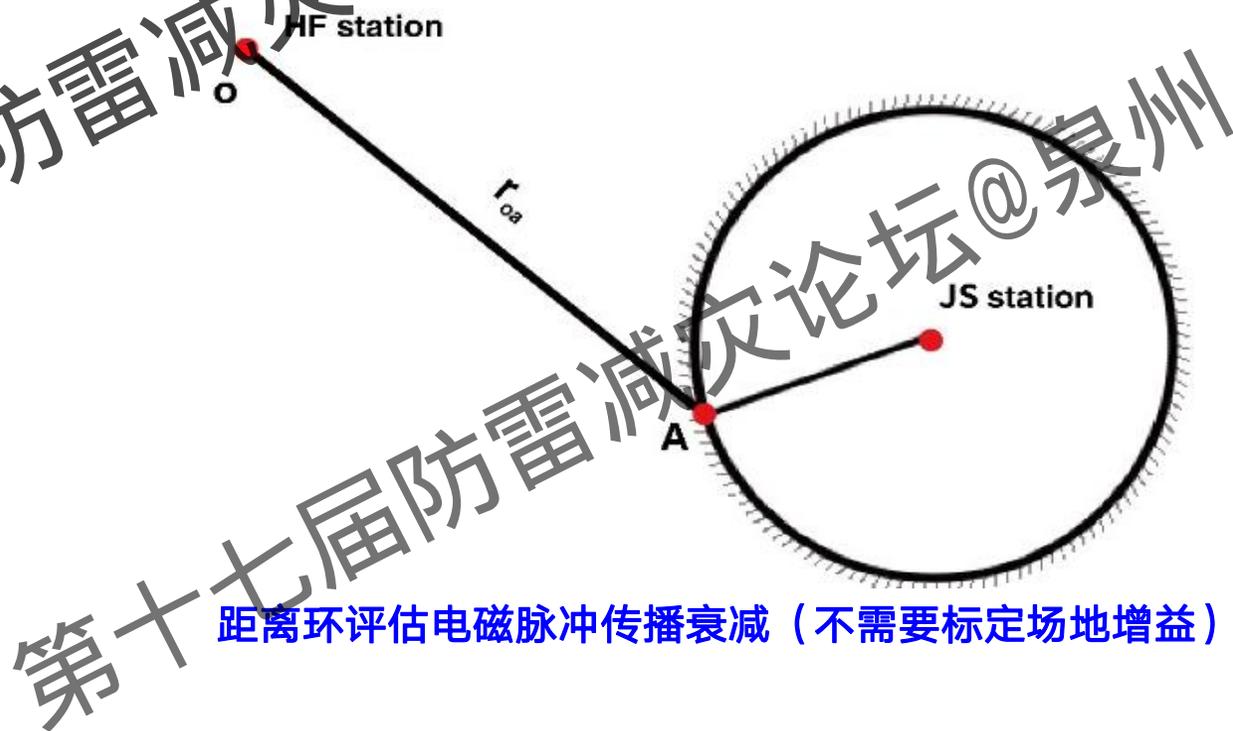
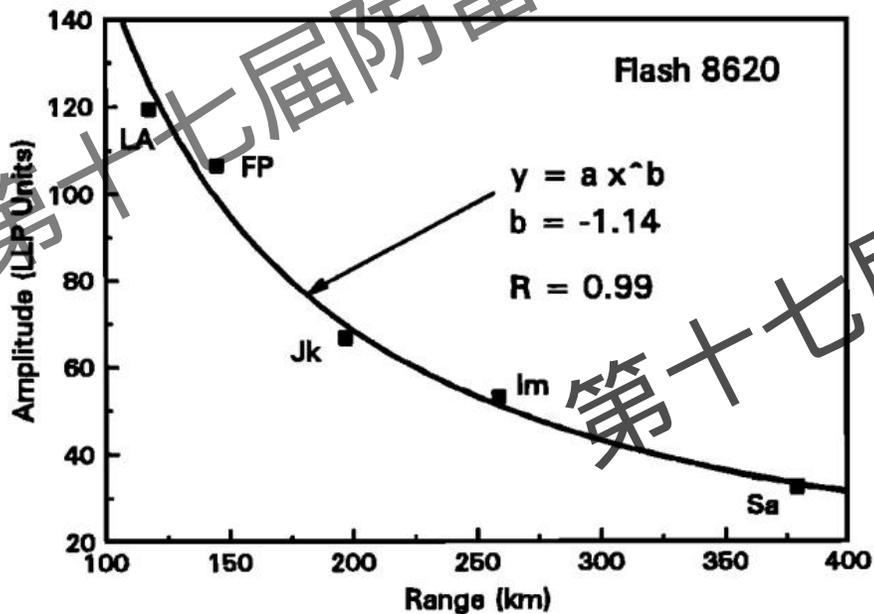
实际测量的闪电信号幅度受场地增益影响

$$E_p = \frac{A(l)}{r} * f(r) = A(l) f(r)$$

$$V_i = G_i A(l) * f(r_i)$$

$$\frac{V_{hf}}{V_{js}} = \frac{\frac{G_{hf}}{G_{js}} * f(r_{hf})}{f(r_{js})} = \frac{k f(r_{hf})}{f(r_{js})}$$

$$\frac{V_{hf}}{V_{js}} = \frac{k}{f(r_{js} = \text{const})} f(r_{hf})$$

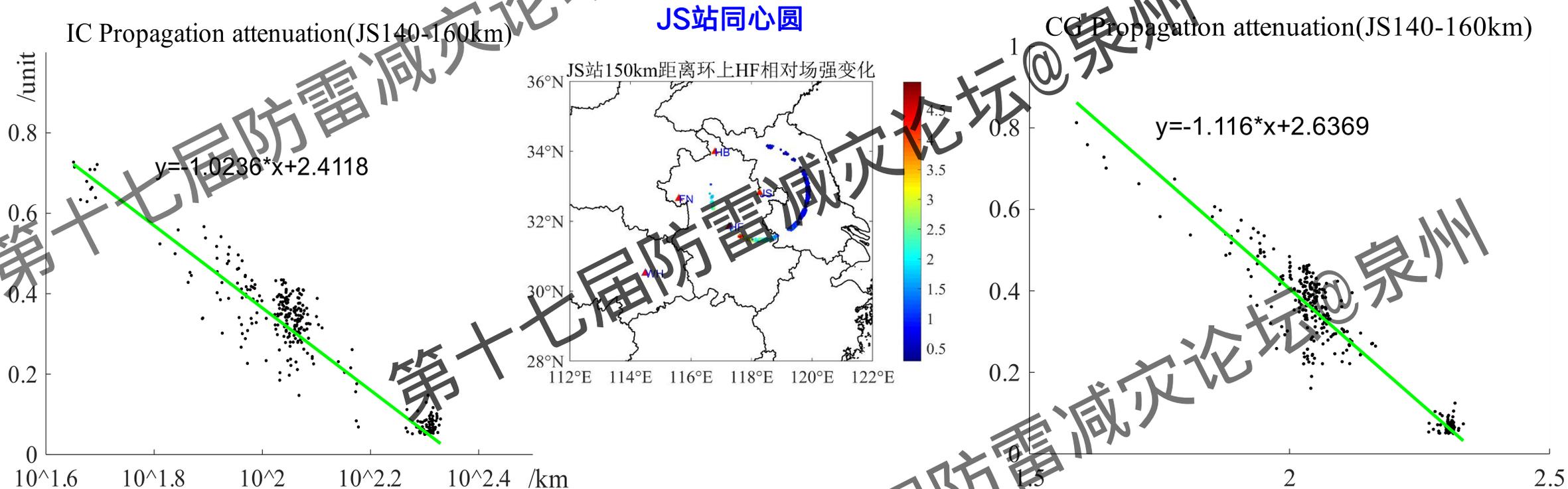


场地增益精确标定，
 利用人工引雷数据指数衰减 (Orville et al., 1991)

距离环评估电磁脉冲传播衰减 (不需要标定场地增益)

JASA评估闪电电磁脉冲传播衰减

大样本地闪和云闪指数衰减差异明显，给出实验证据

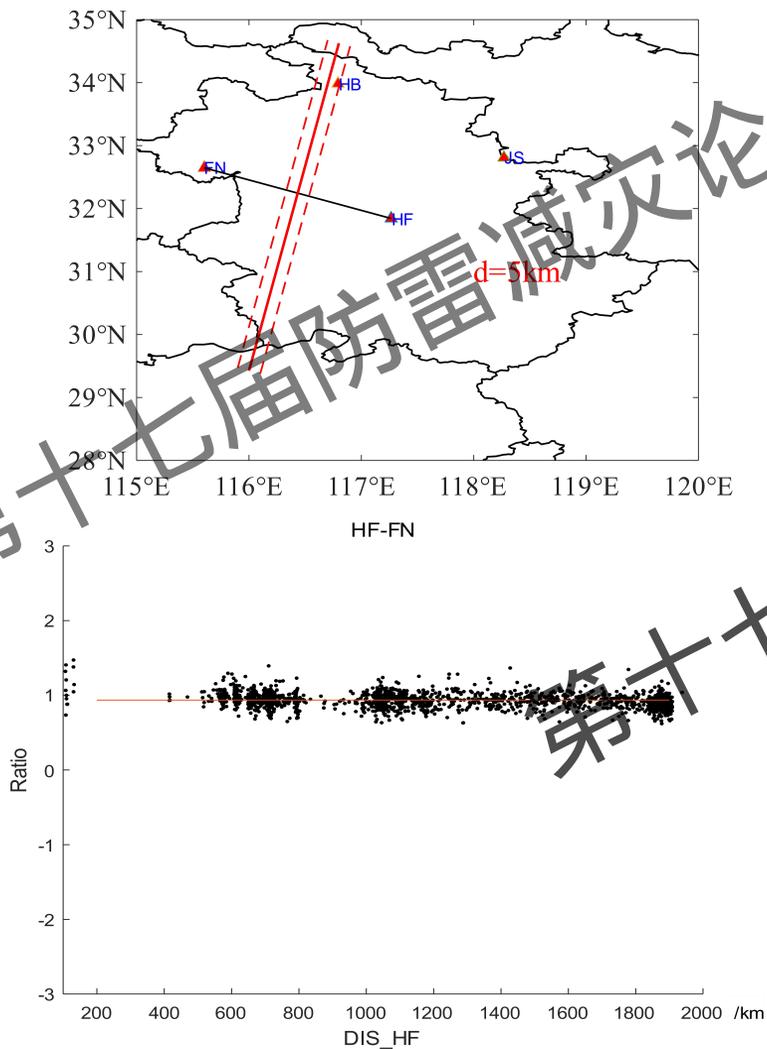


$b=1.0236$ (云闪) & $b=1.116$ (地闪)

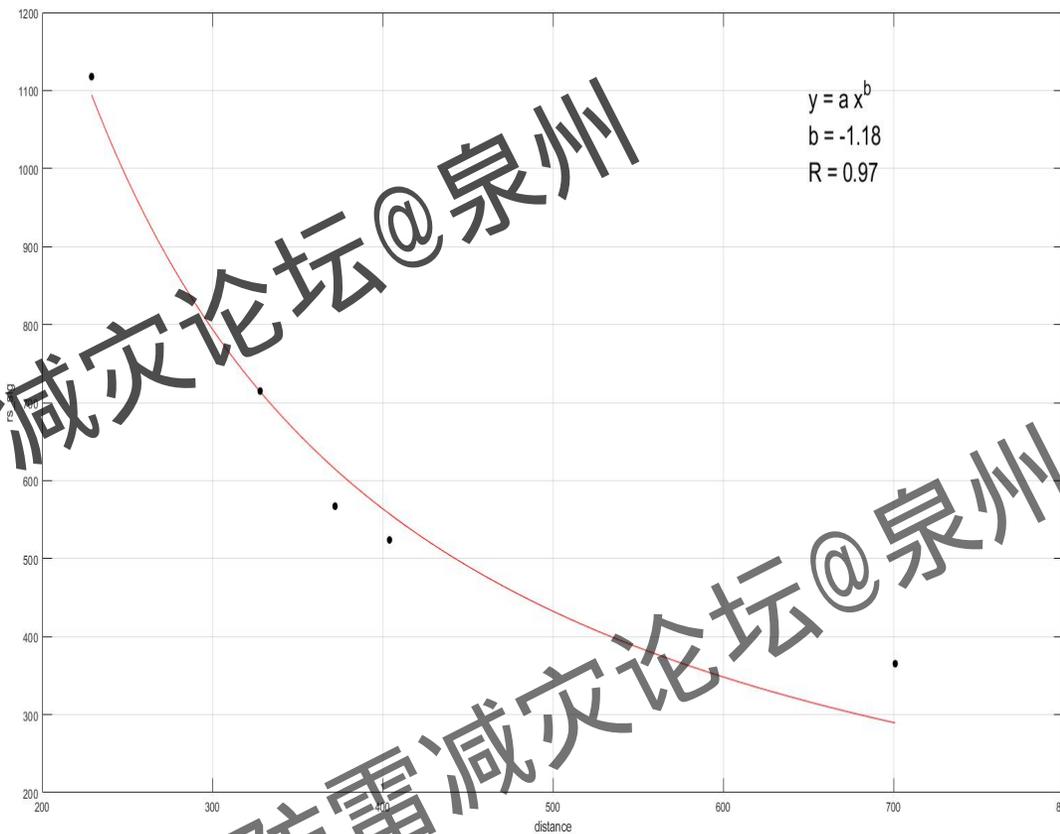
在100km, 未订正的回击电流只有实际幅度的55%

Wang and Zhu, RS, 2022

JASA观测人工引雷波形评估传播衰减



中垂线法标定场地增益



南昌五次人工引雷波形数据得到的幅度衰减特征

$b=1.18$ (地闪)

JASA波形数据研究地闪回击特征

精确回击计数法 (accurate-stroke-count)

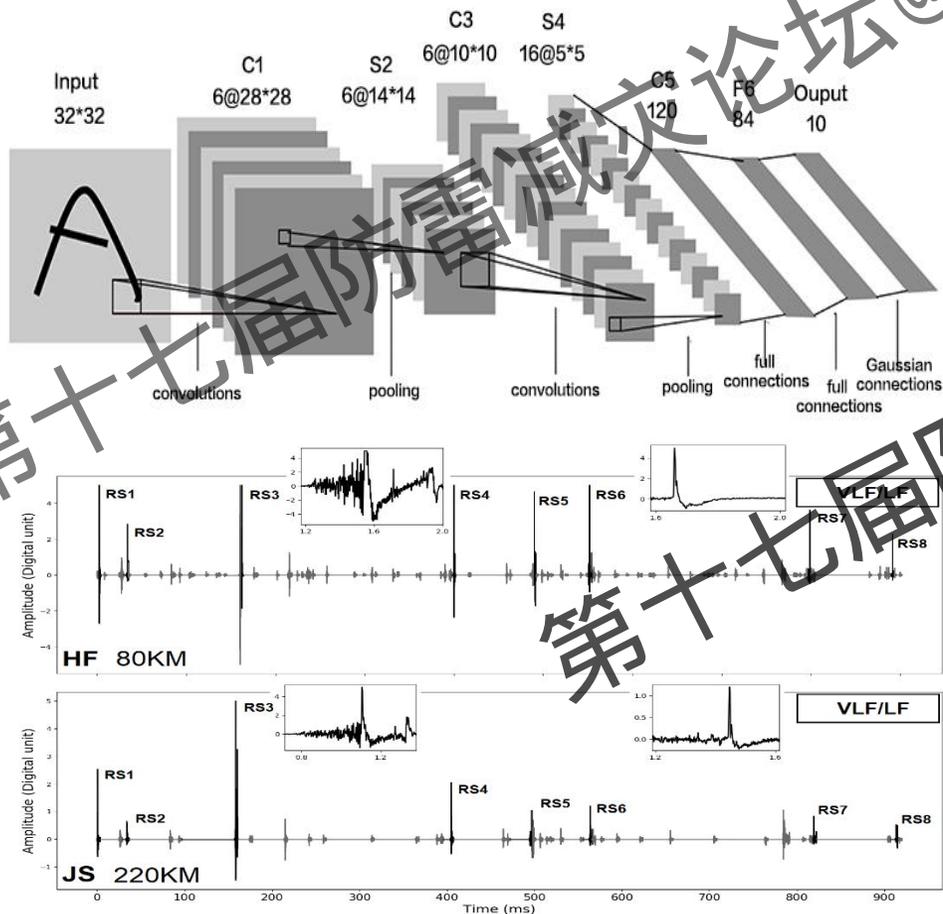
Number of strokes per negative Flash and Percentage of single-stroke flashes observed by several authors.

Study	Location	Total number of flashes	Maximum multiplicity	Percentage of single-stroke flashes	Average multiplicity
Kitagawa et al. (1962)	Sacramento, USA	193	26	14	6.4
Thomson et al. (1984)	Florida, USA	105	17	26	4.0
Rakov et al. (1994)	Florida, USA	76	18	17	4.6
Cooray and Perez (1994)	Upssala, Sweden	137	17	18	3.4
Cooray and Jayaratne (1994)	Colombo, Sri Lanka	81	17	21	4.5
Wu et al. (2002)	Hefei, China	289	16	15	4.2
Srivava et al. (2010)	Azimona, USA	209	17	19	3.9
Saba et al. (2006)	Sao Pau, Brazil	233	16	20	3.8
Ballarotti et al. (2012)	Vale do paraiba, Brazil	883	18	17	4.6
This study	Hefei, China	1085	17	30.5	3.3

小样本给出的单回击地闪比例~20%

JASA波形数据研究地闪回击特征

大样本训练的闪电类型识别器件



卷积神经网络对5次孤立雷暴的准确识别

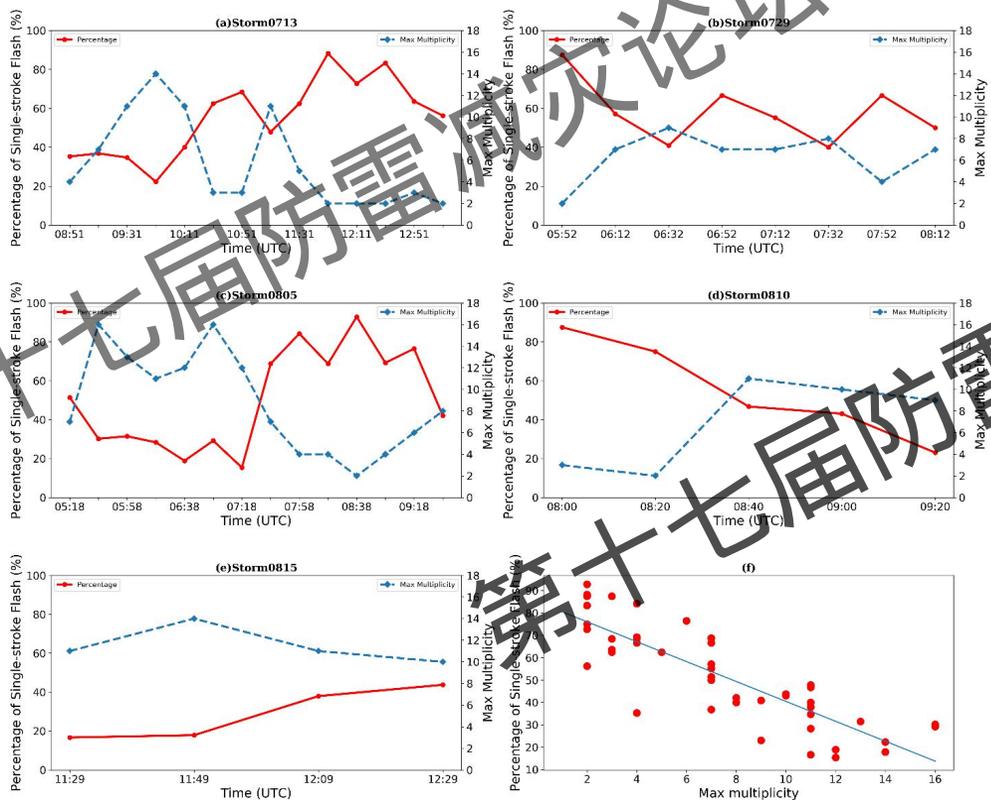
Storm ID	负地闪数	回击数	单回击地闪比例	平均回击次数	机器识别准确率
Hefei, 0715	433	1120	43.3%	2.5	98.9%
Hefei, 0729	223	500	57.3%	2.2	98.8%
Hefei, 0805	801	2724	35.4%	3.4	99.1%
Hefei, 0810	170	488	44.7%	2.8	99.1%
Hefei, 0815	115	461	30.4%	4.0	99.3%
Total	1742	5293	40.7%	3.0	99.1%

利用JASA系统的无缝信号采集优势

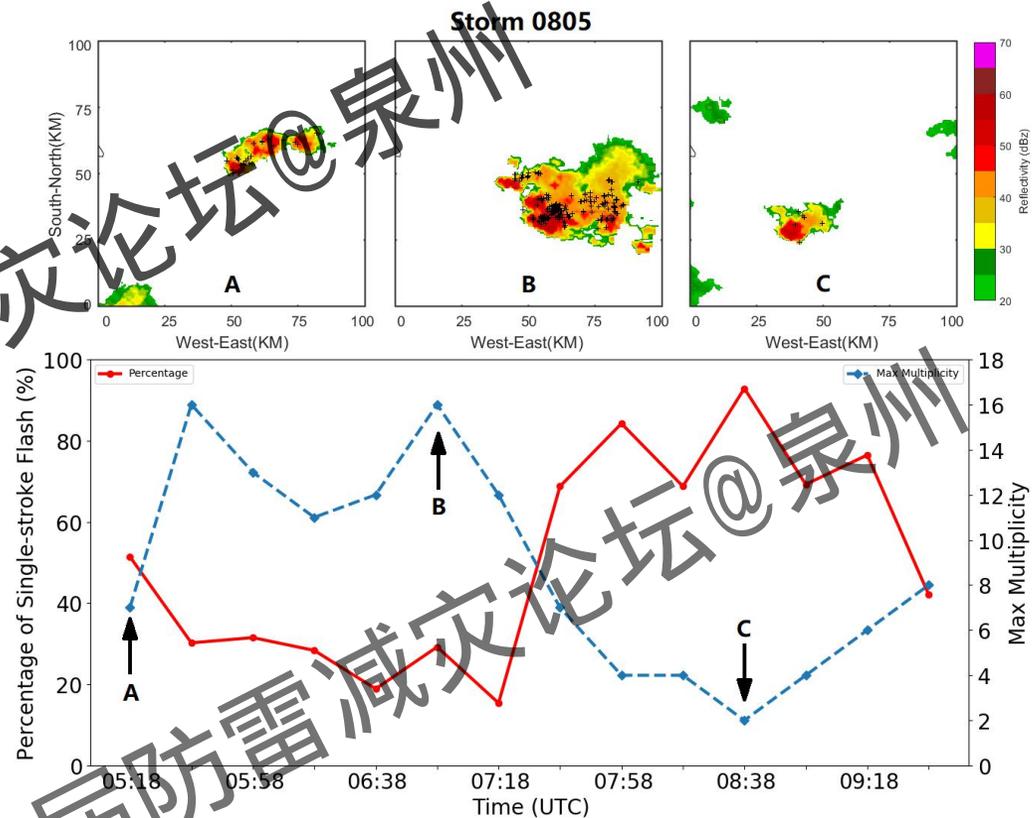
Peng et al., 2020
Zhu et al., 2015

JASA波形数据研究地闪回击特征

雷暴生命史期间回击特征演变



雷暴扩展与回击特征



Peng et al., 2020
Zhu et al., 2015

汇报提纲 | CONTENTS

1

系统简介

2

地基验证

3

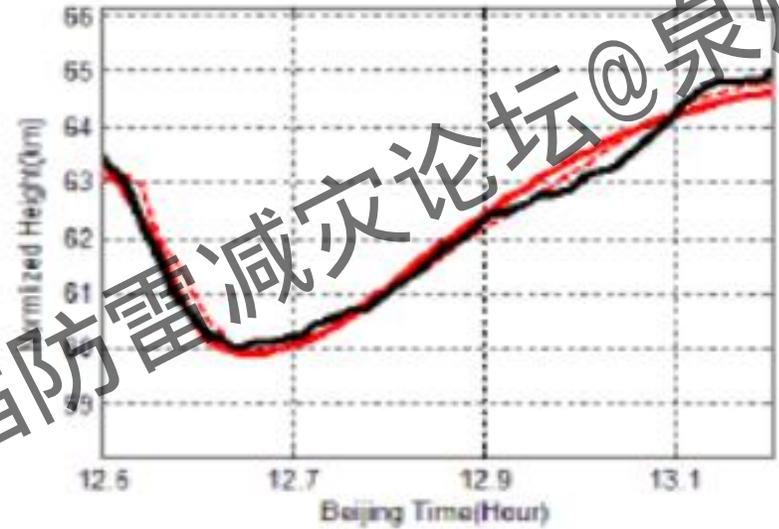
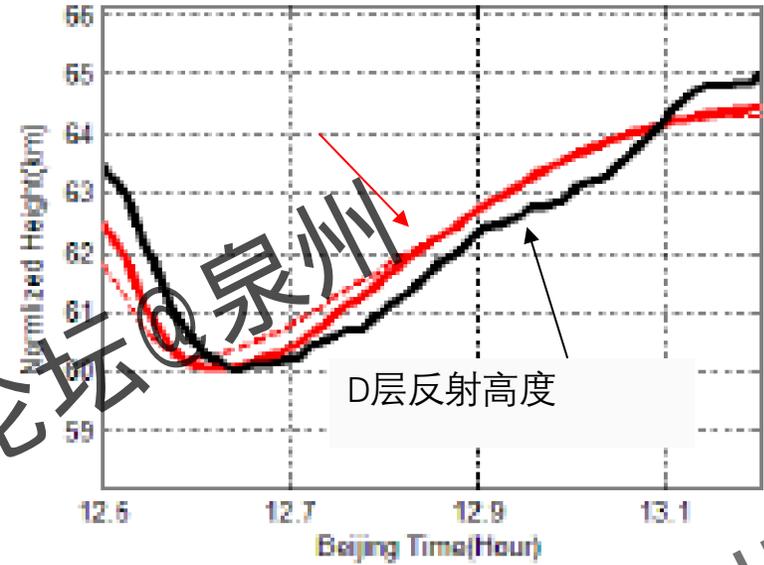
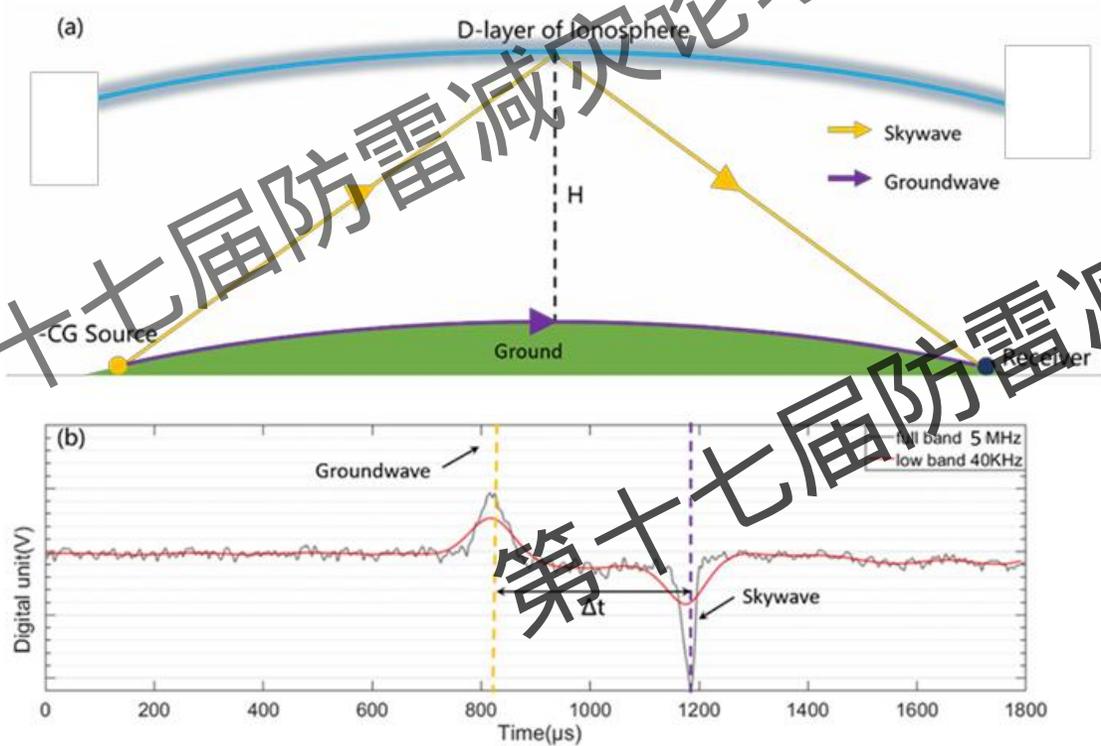
科学研究

4

潜在应用

JASA与电离层探测

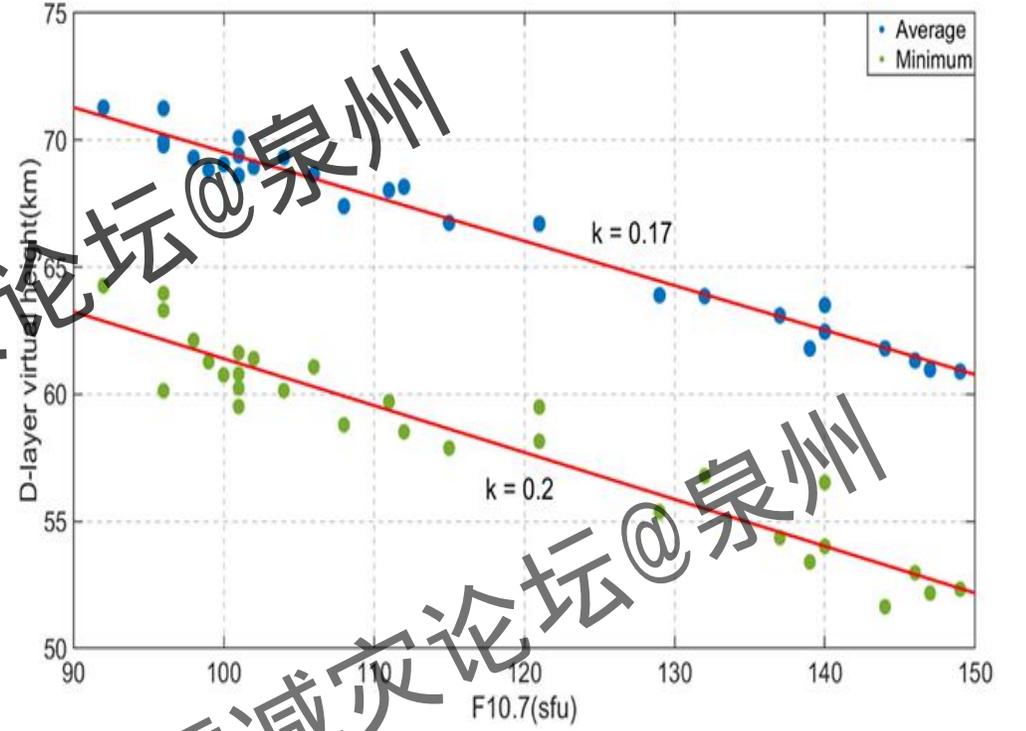
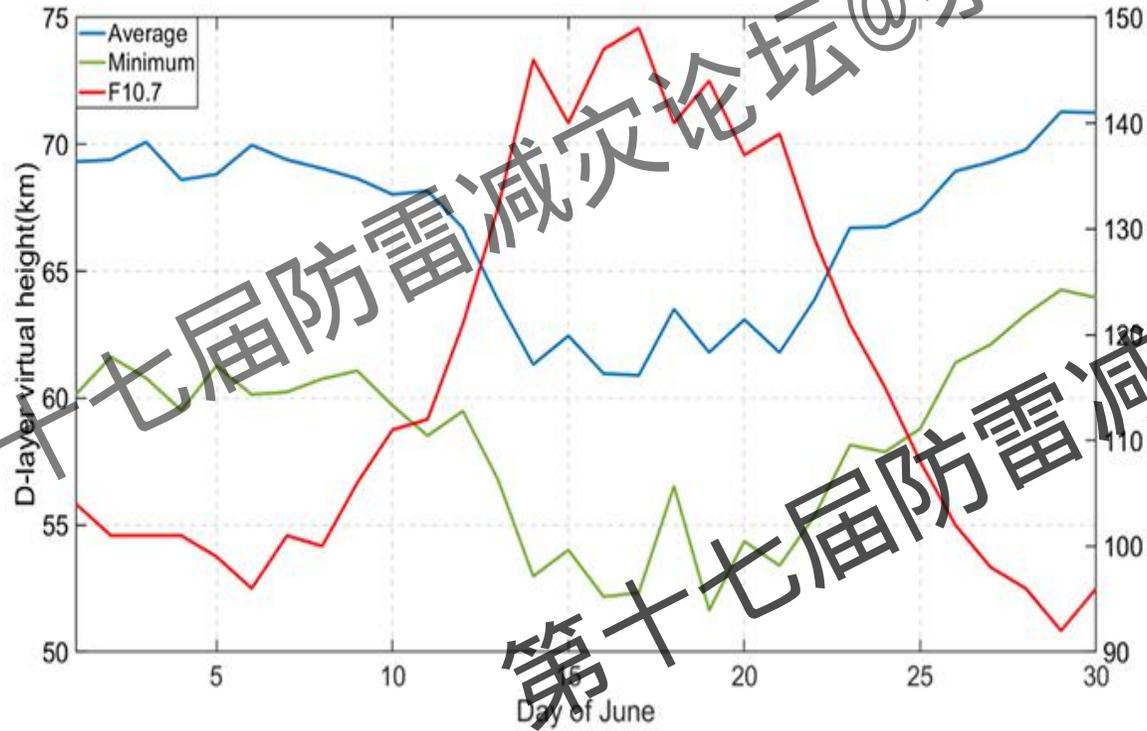
电离层D层也称为未知之层



闪电低频/甚低频电磁波可以为电离层D层反射，国内外正在开发基于闪电源低频/甚低频信号的电离层新探测技术

JASA探测到的电离层对太阳耀斑活动的时间响应 (秦子龙, 2015)

JASA与电离层探测

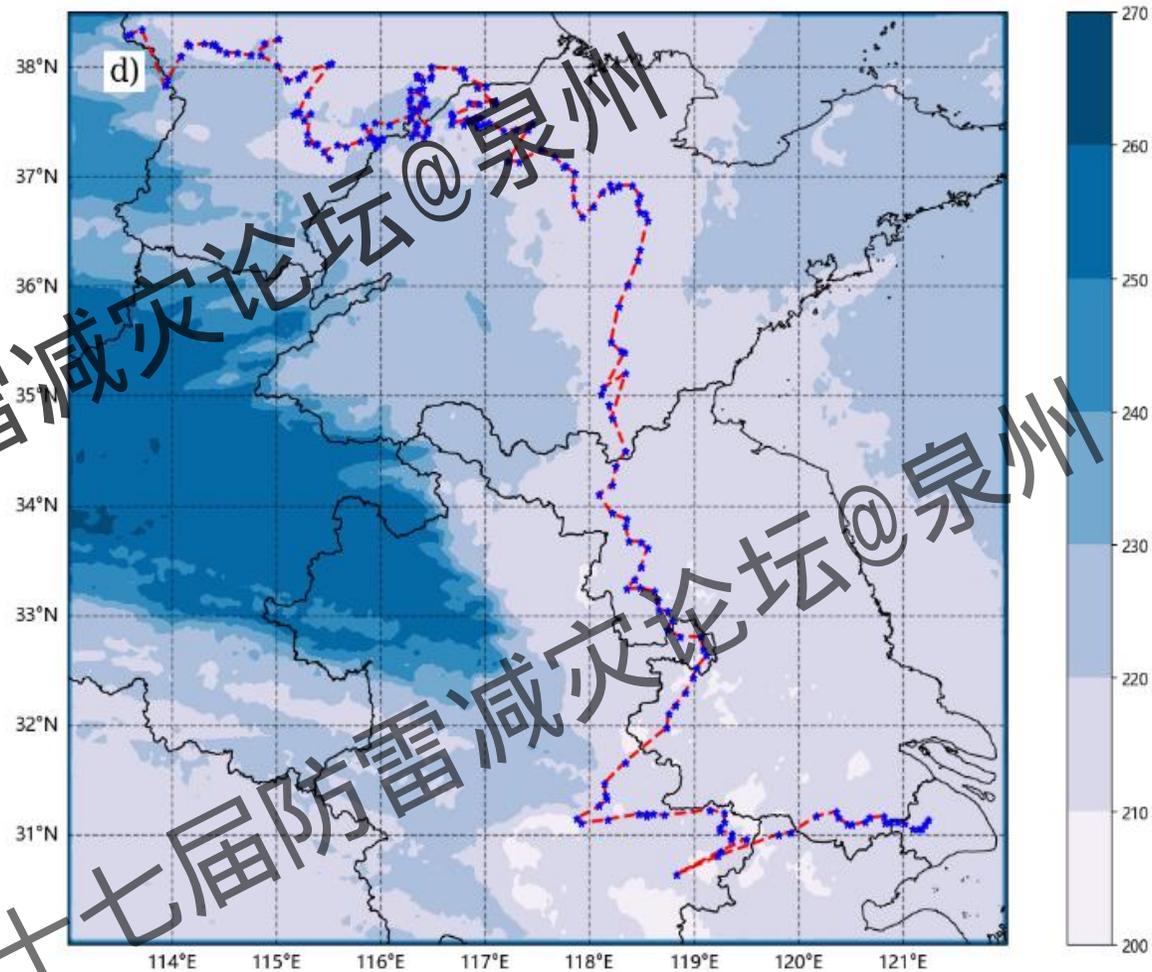
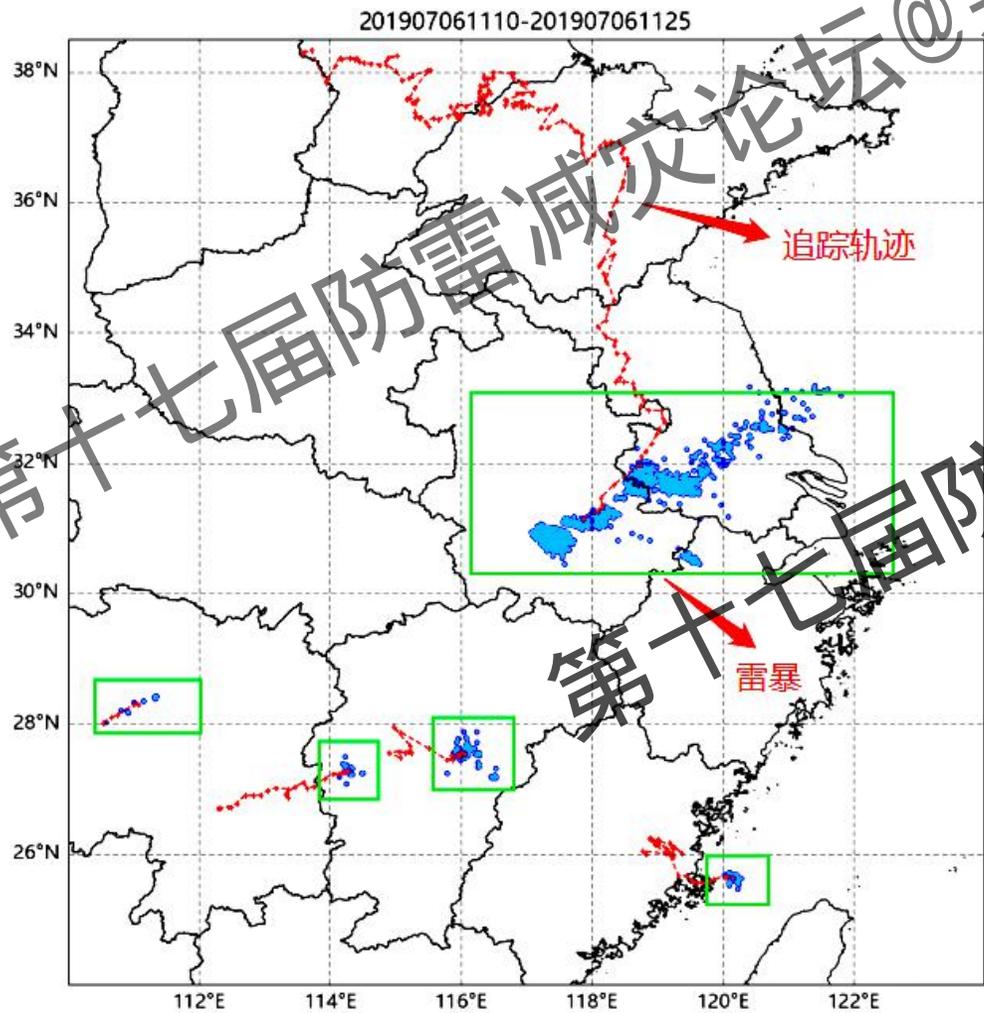


JASA探测到的电离层对太阳辐射的响应 (翟浩源, 2023)

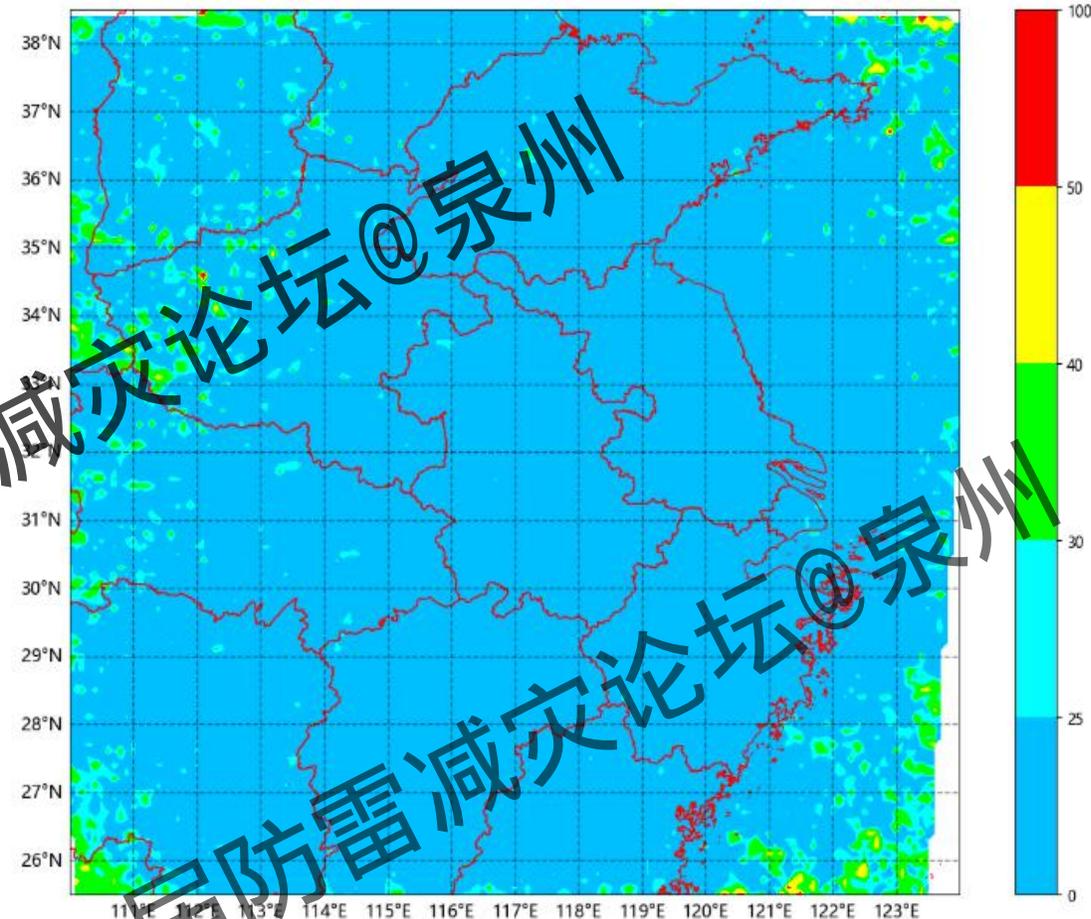
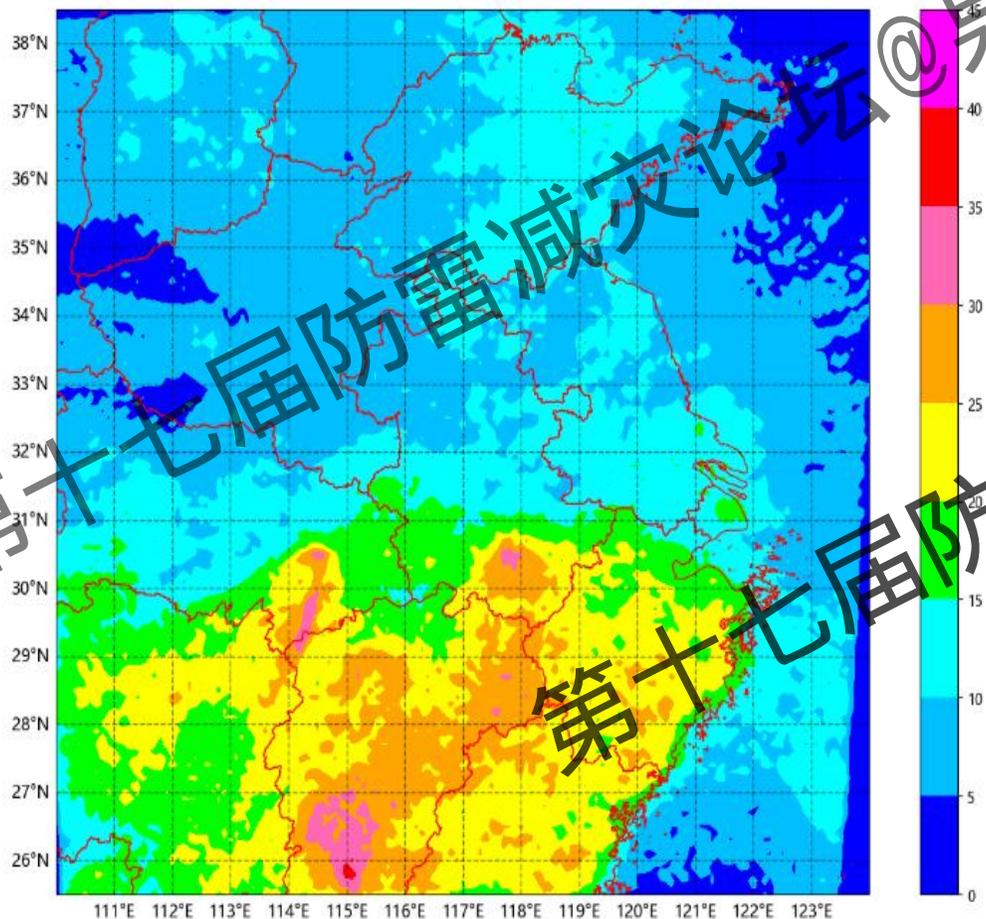
第十七届防雷减灾论坛@泉州

JASA与雷暴追踪

连续闪电定位数据的聚类分析法追踪雷暴

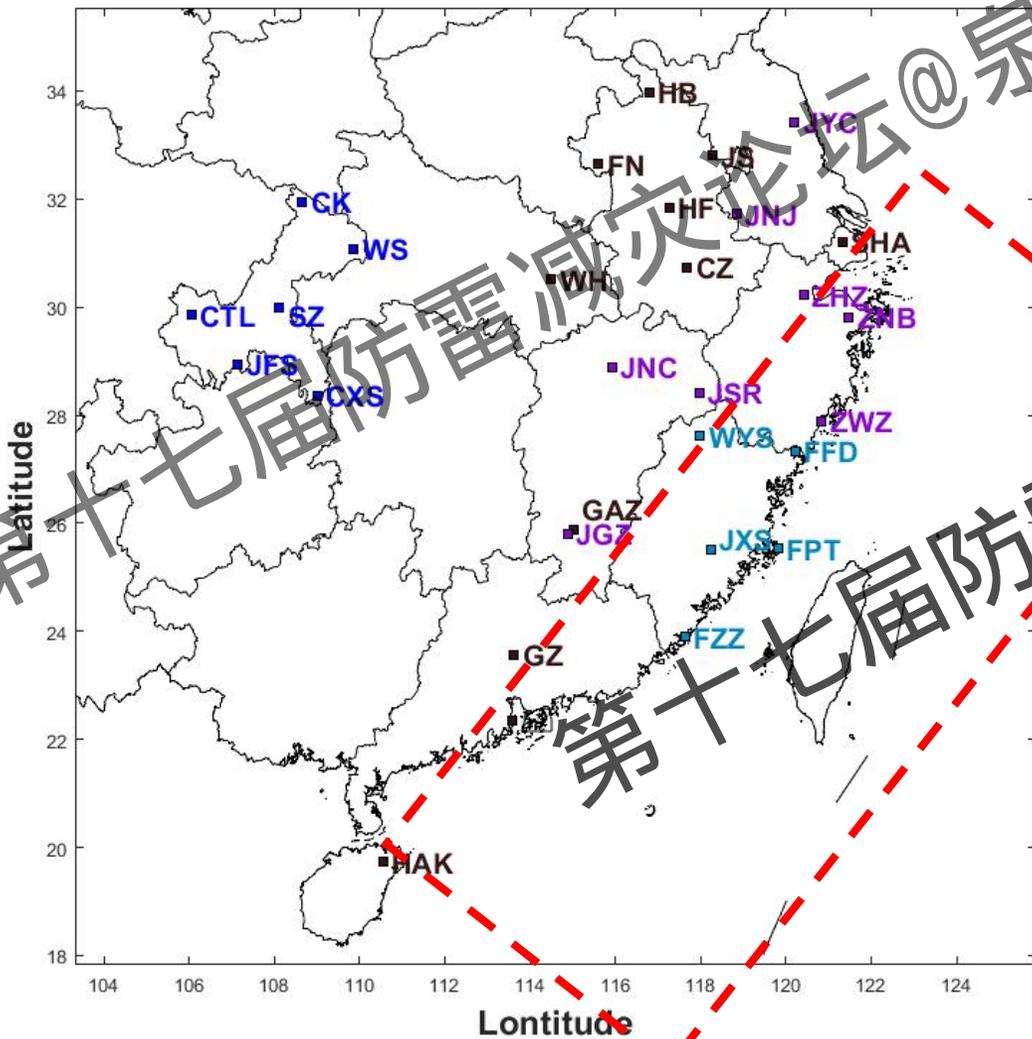


JASA与雷暴追踪



对雷暴的实时监测是雷暴预警的可靠手段!!!

JASA强对流预警



- 合肥佳讯科技有限公司
- 科大地空学院
- 气科院 (以及南京创新研究院)
- 重庆气象局
- 福建气象局
- 唐山气象局

基于陆基子站的海上强对流实时监测

第十七届防雷减灾论坛@泉州

混合长基线天电阵列

THE
END

谢谢!

第十七届防雷减灾论坛@泉州

第十七届防雷减灾论坛@泉州

第十七届防雷减灾论坛@泉州