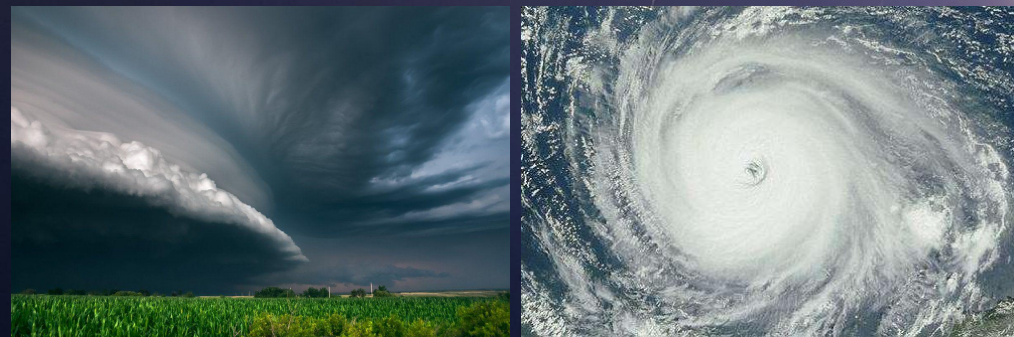


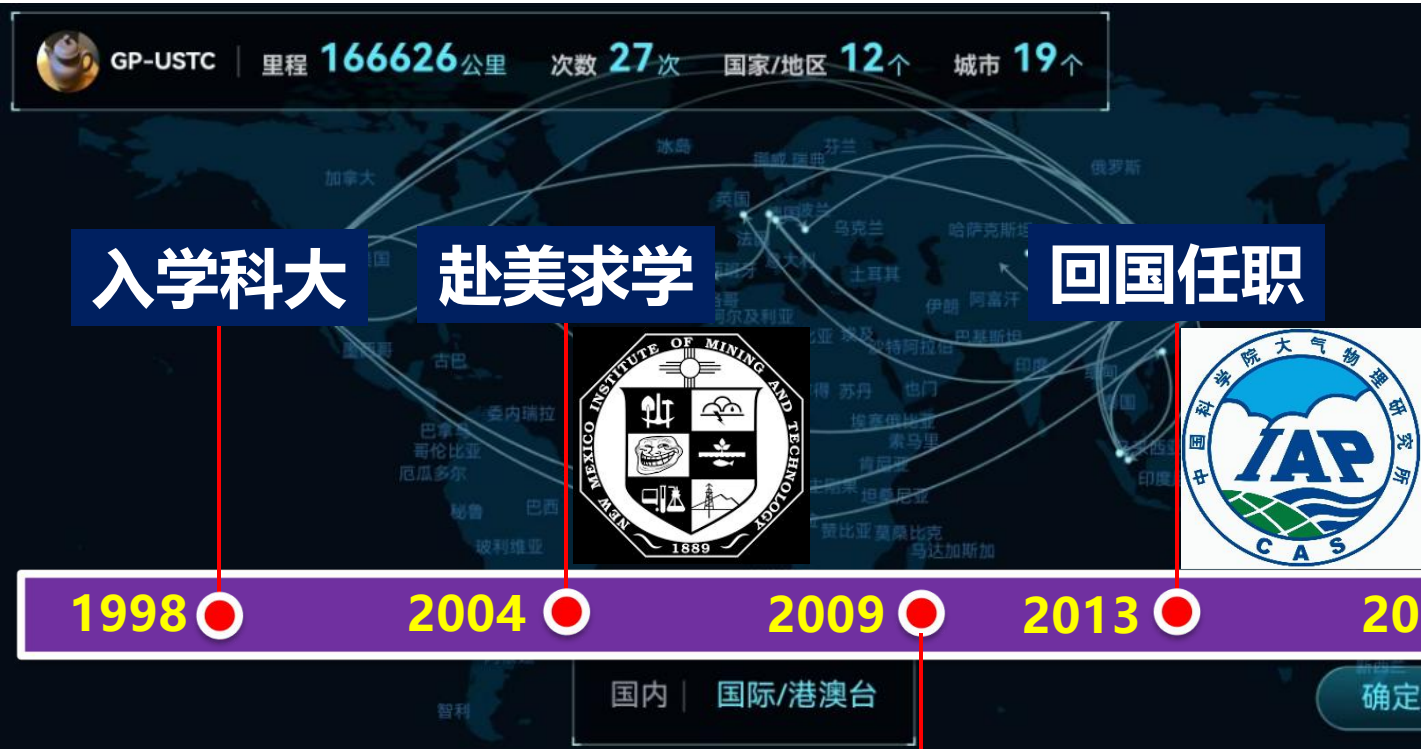
基于公众爱好者观测数据的雷暴临近空间 瞬态电磁效应研究进展

陆高鹏

gaopengl@ gmail.com
gplu@ustc.edu.cn

中国科学技术大学
地球和空间科学学院





- 无锡市“太湖人才”计划 (2020年)
- 无锡锡山东港镇科技镇长 (2022年)
- 合肥第55中学科学副校长 (2024年)

重返科大 | 学科点长



红专并进，
理实交融！
郑沫若

博士后研究



优青资助

加入民盟







安徽省气象学会
ANHUI METEOROLOGICAL SOCIETY



全国科普日

科而优则普
气象科普讲堂

提升全民科学素质 助力科技自立自强

会校联动

爱心课堂



天文 气象

开学第一课

宇宙大爆炸与红色精灵

主办单位：安徽省气象学会、宿州市气象局、宿州市科学技术协会
协办单位：宿州市气象学会、阜阳市气象学会、合肥市气象学会、灵璧县气象局、太和县气象局、灵璧县科学技术协会、太和县科学技术协会、灵璧县第一中学、太和县第八中学

时间：9月14日（周四）14:30-16:00
#腾讯会议：274-799-044



交叉学科

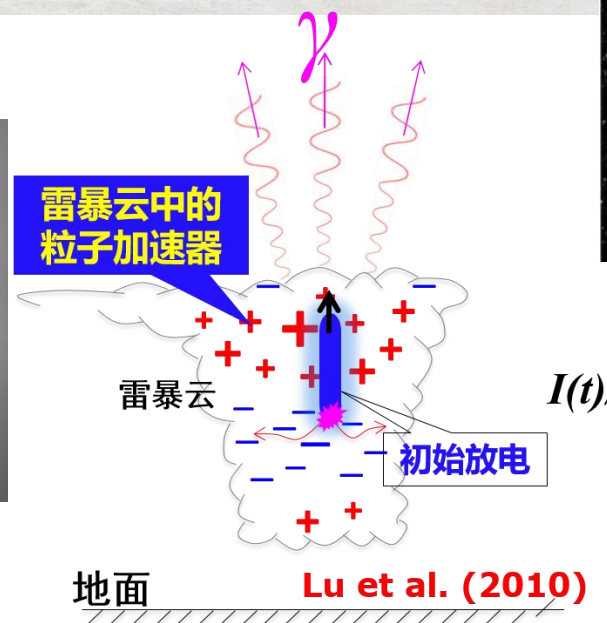


主讲老师：赵文 中国科学技术大学天文学系 教授、博导
报告主题：宇宙大爆炸
专家介绍：2002年和2006年分别在中国科学技术大学天文学系获得学士和博士学位。之后分别在英国卡迪夫大学、韩国天文与空间科学研究所、丹麦尼尔斯玻尔研究所从事博士后研究。2012年回到中国科学技术大学天文学系任教授。曾先后获得中国科学院百人计划A类并终期考核优秀、基金委优秀、国家杰青等。研究方向为宇宙学和引力波天文学。

主讲老师：陆高群 中国科学技术大学地球和空间科学学院 教授、博导
报告主题：雷暴与临近空间
专家介绍：2003年本科毕业于中国科大，之后到美国新墨西哥矿业技术学院朗穆尔实验室攻读物理学博士学位，先后在美国杜克大学、中科院大气物理研究所从事大气和空间电学研究，2016年获国家优秀资助，并于2019年回到中国科大任教，目前担任大气科学专业学科点负责人。

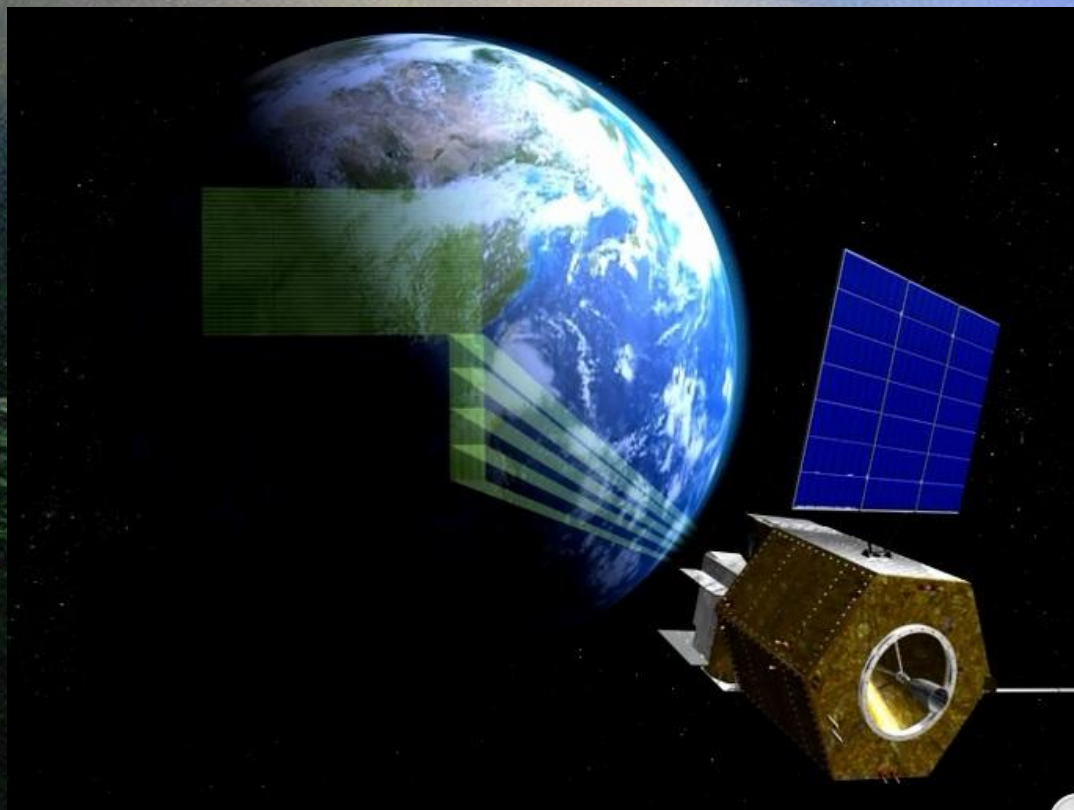


熊少林 研究员
中科院高能所

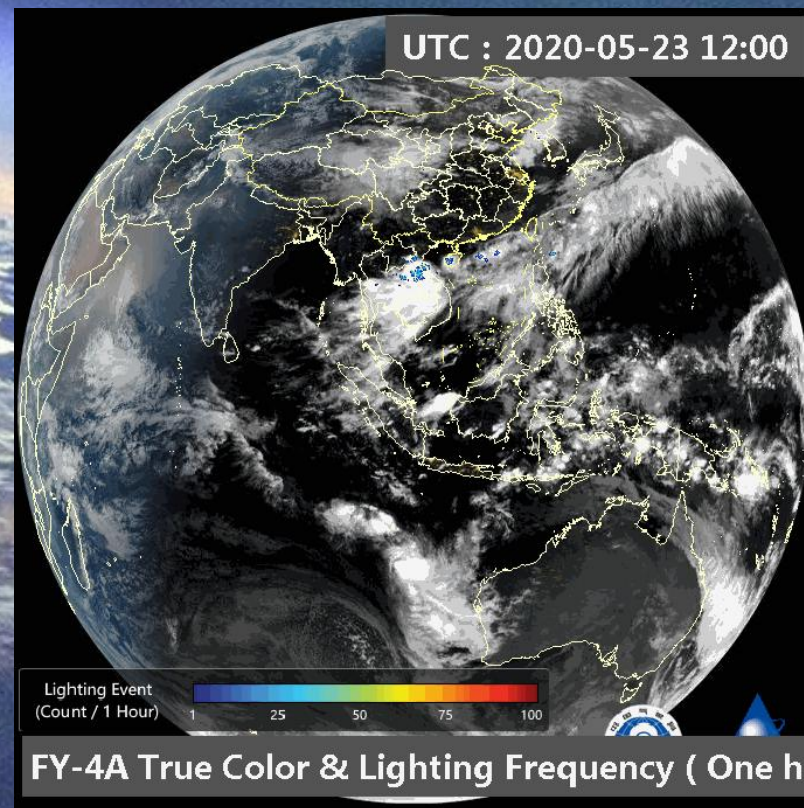


地球大气层是什么样的？

2016年12月11日，中国在西昌卫星发射中心成功发射风云四号地球静止轨道气象卫星，其搭载的闪电成像仪使我国首次能够在距离地球36000公里的太空对地球上的闪电进行成像（每秒500张）。

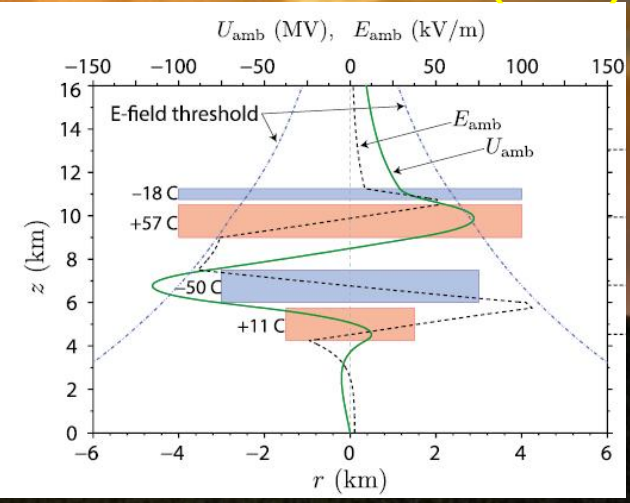
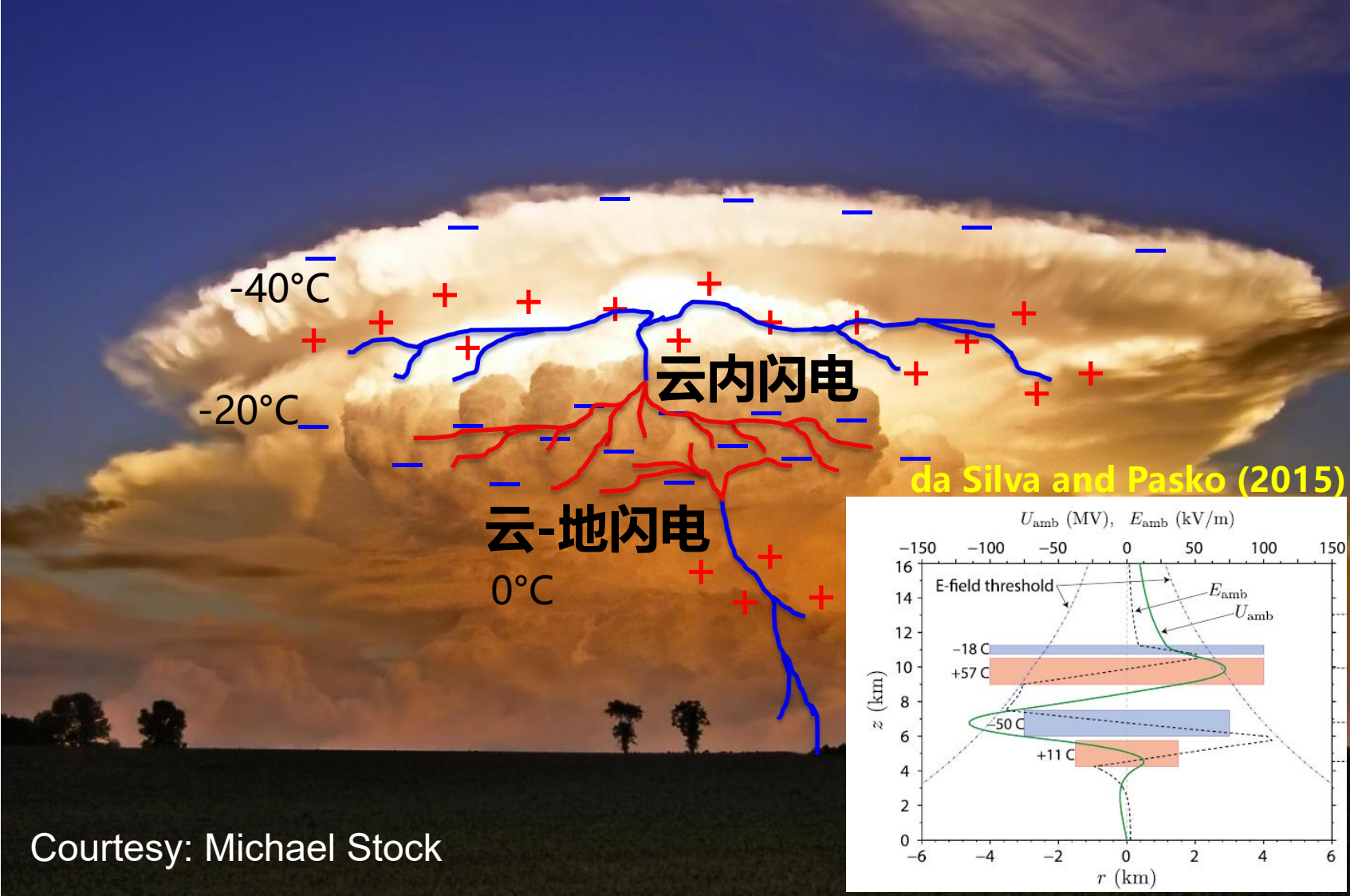


风云四号A卫星



地球同步轨道视角

雷暴和闪电

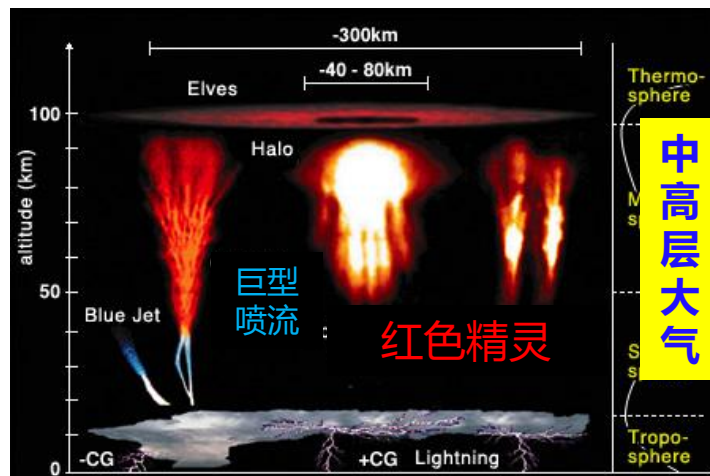


闪电物理及其电磁辐射效应



对流层

闪电 (大气)



中高层放电现象 (空间)



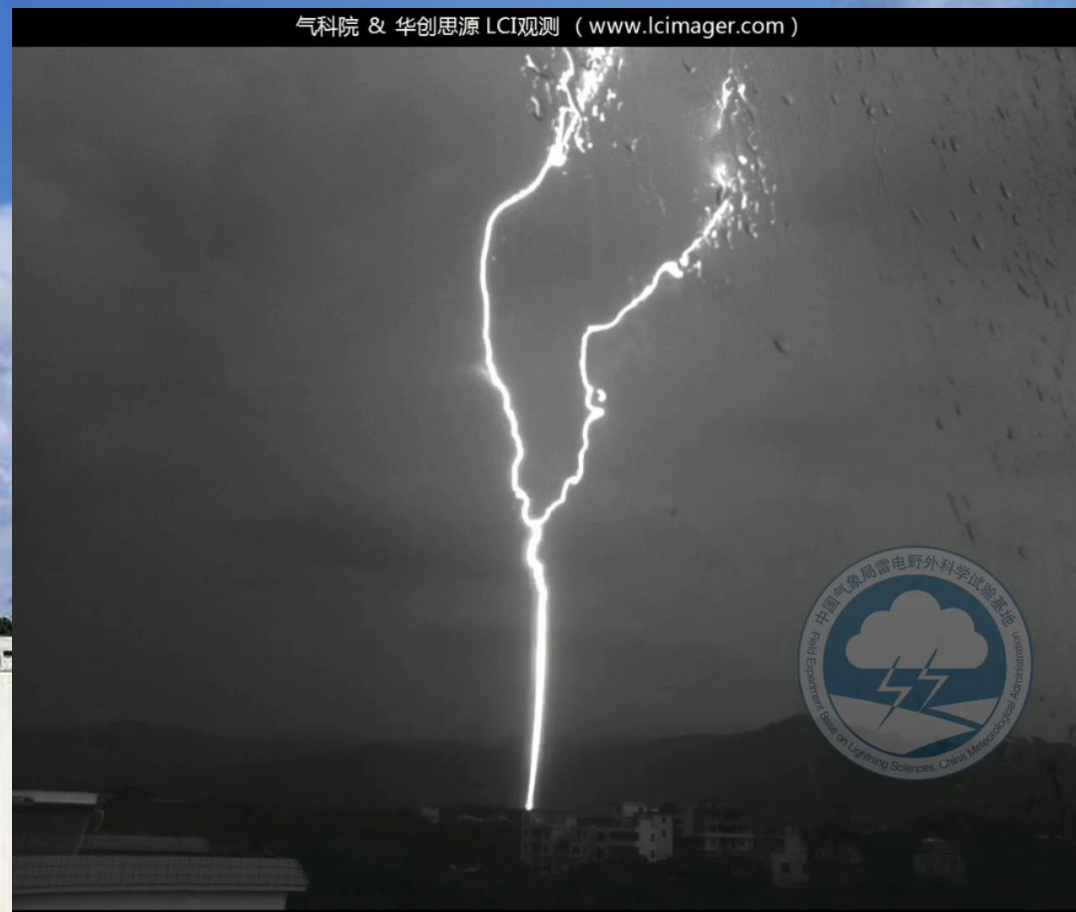
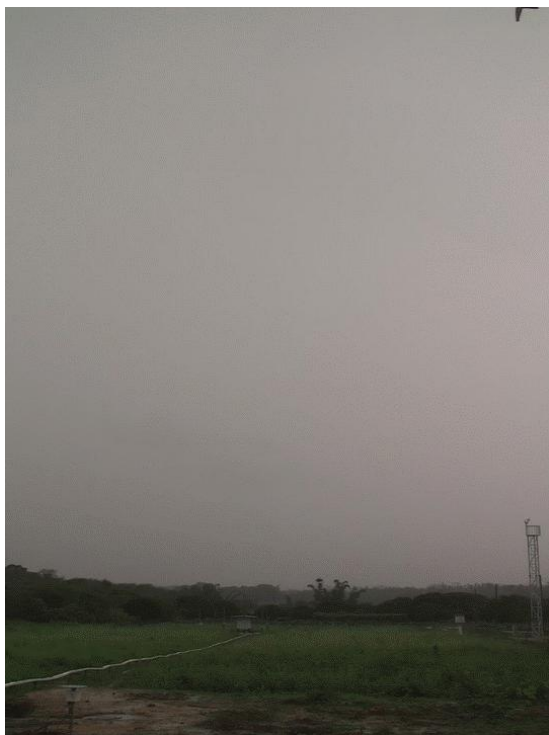
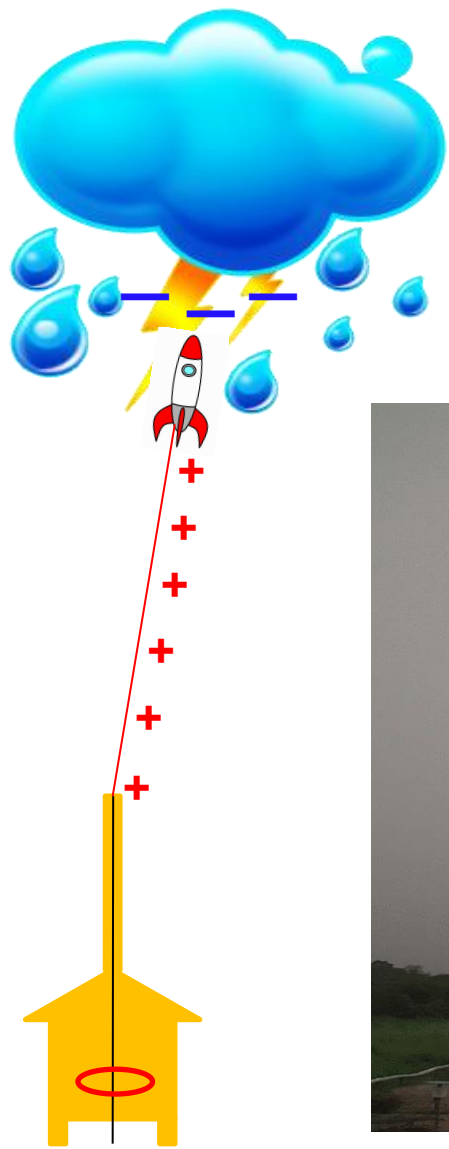
近地空间

地源伽马脉冲 (天文)

- 对流层雷暴同中高层大气的瞬态电磁耦合
- 闪电对近地空间环境安全的影响
- 中高层放电过程的物理、化学效应

对流层中的闪电是如何影响近地空间环境的？

人工引雷-在地表大气层中做放电物理实验



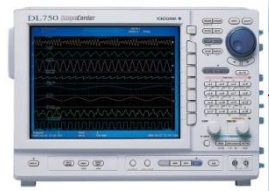
视频由吕伟涛研究员提供

2025-8-4

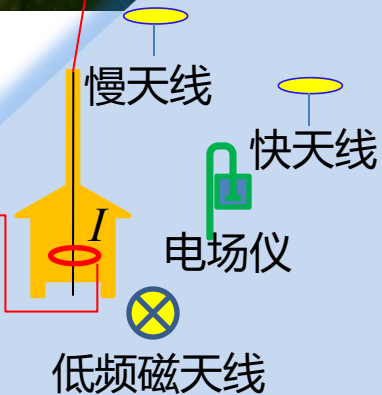
中国气象局从化人工引雷基地

低频磁场测量在人工雷电实验中的引用

- 通道底部的电流测量
- 不同距离处的电磁场测量
- 高速光学及短基线甚高频系统的闪电观测
- “电-高能-光-磁”综合测量
- 地面多站的闪电成像观测



DL 750



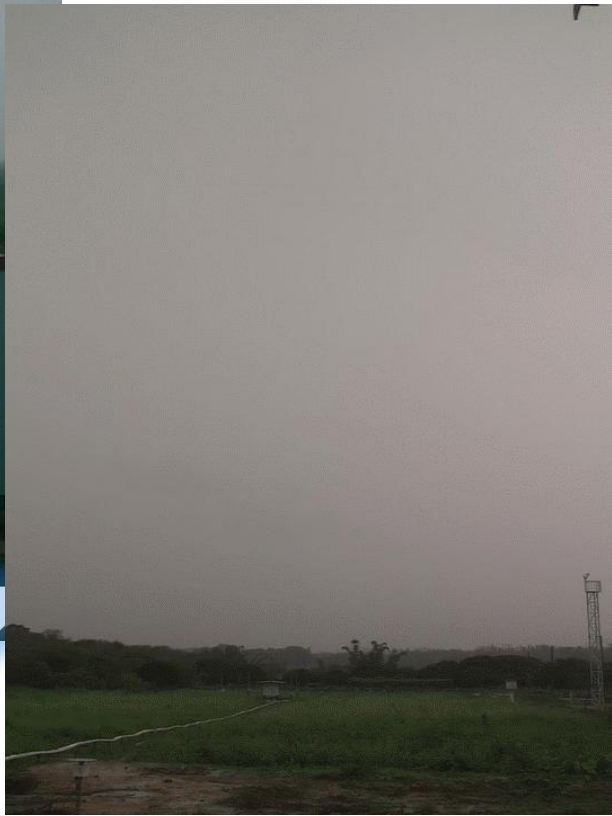
引雷点 (30-78米)



短基线VHF系统



主观测点 (970米)



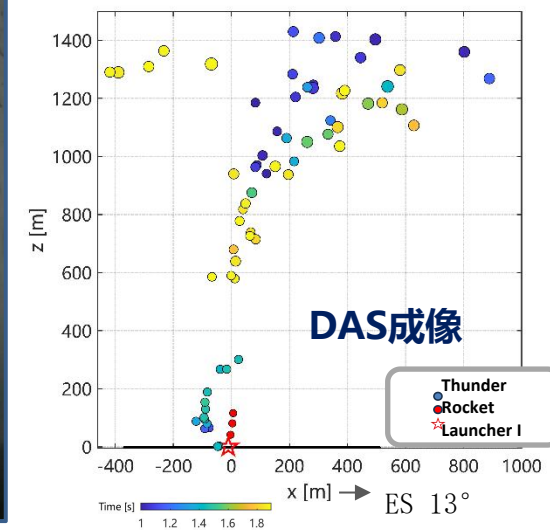
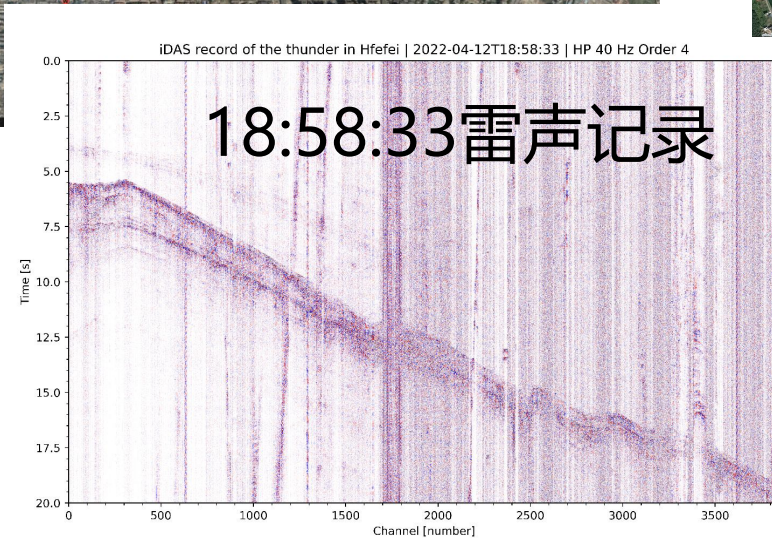
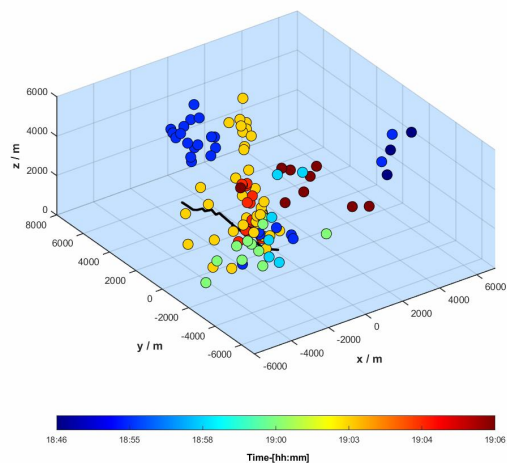
(Courtesy: Dong Zheng)

17:46:08, 7 June 2011

基于分布式光纤的量子雷电探测



1847-1907的118个雷声事件



AEFI大气电场仪

Atmospheric Electric Field Instrument



观测原理

AEFI 型大气电场仪传感器基于电荷感应原理,利用接地金属板对电场的屏蔽作用,使另一金属板上的感应电荷发生周期性变化而形成电流,然后通过检测电流的大小来检测电场强度。传感器有两组大小一致、均匀分布的扇形金属片,分别称之为定子(感应片)和转子(接地金属屏蔽片)。转子通过轴与电机相连,可自由转动。当转子旋转时,定子交替暴露在外电场中或被转子遮挡,这样周而复始,便产生交变输出信号。通过测量交变输出信号就可测量空间大气电场值。

功能特点

- 核心处理芯片采用低功耗、高性能 ARM 芯片,加上完善的外围电路,设备功耗更低,扩展性更强;
- 探头部分采用 304 不锈钢制造,保证长时间不受环境腐蚀;
- 传感器探头与数据采集部分采用分体设计,便于管理维护,避免因部分故障而更换整套设备;
- 上位机软件具备组网功能,软件可同时接收和处理闪电定位数据,大大提高雷电预警的准确性;
- GPS / 北斗授时,保证了设备数据时间的准确性;
- 通讯接口增加防雷浪涌保护,保护设备免遭雷电冲击波袭击;
- 探头采用朝下设计方式,避免因灰尘、雨雪等干扰转子转动,影响电场数据。
- 增加“已获得 Ex db IIC T6 Gb 防爆等级资格认证”



性能指标

测量范围: $-50\text{kv/m} \sim +50\text{kv/m}$ (可定制: $-100\text{kv/m} \sim +100\text{kv/m}$)	响应时间: $\leq 50\text{ms}$ 预警时效: $> 0.5\text{h}$
模拟输出范围: $-7.5\text{V} \sim +7.5\text{V}$	抗风: $\leq 30\text{m/s}$, 正常工作
分辨率: 10V/m	供电: $100 \sim 260\text{V}$ 交流 (50Hz)
灵敏度: $\leq 20\text{V/m}$	工作环境温度: $-40^\circ\text{C} \sim +60^\circ\text{C}$
线性度: $\leq 1\%$	相对湿度: $10\% \sim 100\%$
测量: $\leq 5\%$	存储环境温度: $-50^\circ\text{C} \sim +60^\circ\text{C}$
电机转速稳定度: $< 1\%$	三色报警: 一级—红; 二级—黄; 三级—绿色
功耗: $\leq 3\text{W}$	

业务应用

AEFI 型大气电场仪主要应用于国家基本气象站、航空航天保障、各种(常规)气象观测站、其他行业气象监测站如林业、农业、石油、电力、水利、矿区建筑工厂等行业对雷电预警服务的需求。

智能雷暴仪

Intelligent Thunderstorm Instrument



观测原理

- 观测闪电发生过程中辐射的低频/甚低频电磁波信号,包括磁场信号和电场信号。
- 采用线圈,通过电磁感应现象测量磁场变化信号通过正交线圈测量东西和南北方向上的磁场信号分量,通过分量的大小确定磁场的来向;
- 采用平板天线,利用电荷感应原理测量电场变化信号;
- 利用电荷感应原理测量静电场变化信号。

功能特点

- 雷暴仪,用于代替人工观测雷暴活动,促进气象观测手段自动化和气象观测现代化的发展。
- 实现自动化观测雷暴,取代现有的人工观测手段。
- 自动化观测雷暴相较于人工观测有全天候 24h 室外观测,避免人工观测漏点、漏时间的问题。
- 数据资料电子化,方便保存、查询和迁移。
- 获得雷暴监测预警信息、雷暴信息和雷暴单体信息等观测要素。

技术指标

功能技术指标

雷暴时间精度: $1\text{min} \sim 6\text{min}$, 可设置
雷暴方位误差: ≤ 1 个方位
雷暴距离误差: $\leq 5\text{km}$
雷暴探测半径: 30km
探测效率: 单个闪电雷暴为 $\geq 90\%$
多个闪电的雷暴 $\geq 95\%$

监测预警技术指标

监测区域半径: 15km
平均提前时间: $\geq 15\text{min}$
漏报率: $\leq 30\%$
虚报率: $\leq 30\%$



业务应用

气象观测站代替人工观测雷暴活动。

融合射频磁场
定向技术



上海晨辉&中国科大联合研制的智能雷暴仪



四通道传感器
放大电路



信号分析和采
样系统



校园部署测试

- 2025年2-4月份参加“向阳红1号”南海航次科考
- 海上雷暴短临监测测试和算法数据采集
- 设备的高温及海雾防护性能测试

雷暴生命周期的地表电场变化

电场强度分析图

场强值 平均值 变化率 预警级别 闪电距离 闪电强度

绿色点为雷电探测网结果

电场强度 kv/m

2025年3月3日上海站点数据

雷暴起电阶段 雷暴活跃阶段 雷暴消散阶段

闪电强度 ka 距离 km

03-03 07:30

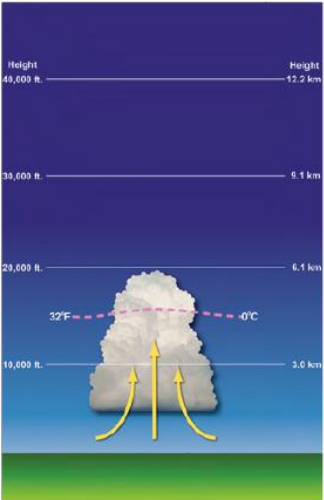
03-03 08:00

03-03 08:30

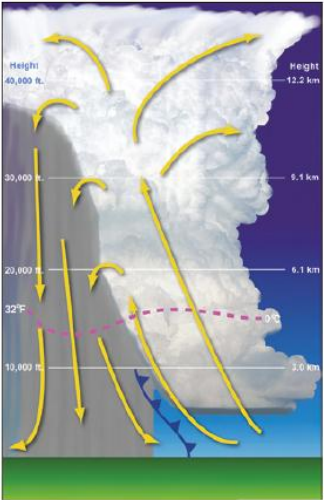
03-03 09:00

03-03 09:30

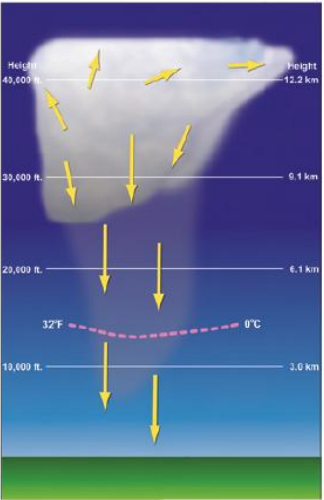
2025-03-03T00:00:00 (UTC)



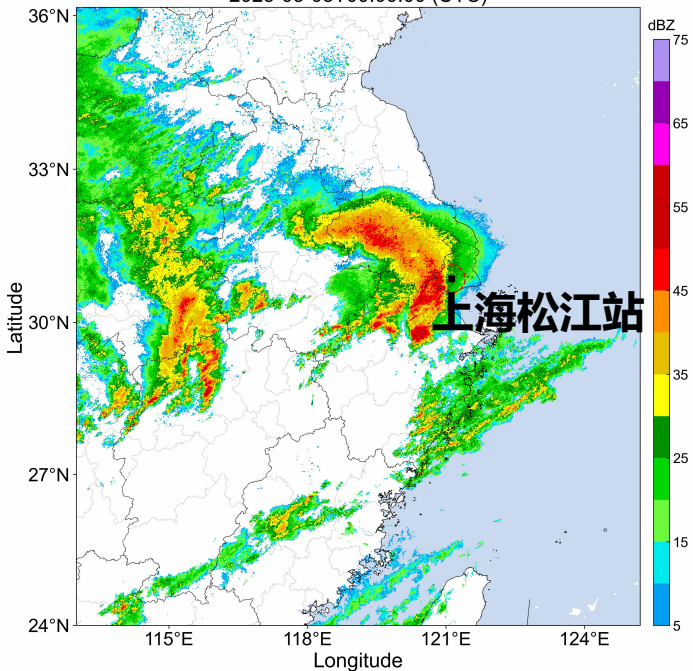
Developing Stage



Mature Stage



Dissipating Stage



对流层雷暴驱动的地球系统圈层耦合过程研究



重力波

电磁场

电荷

电磁场&电荷



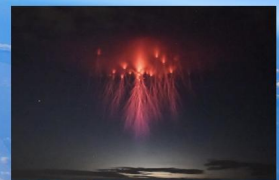
强对流



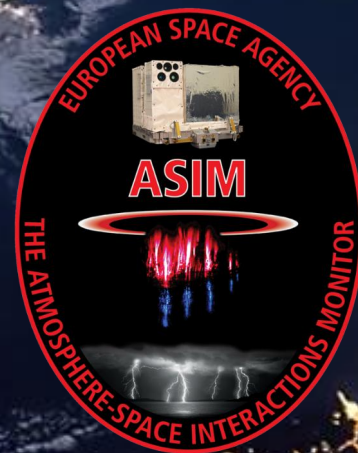
雷电



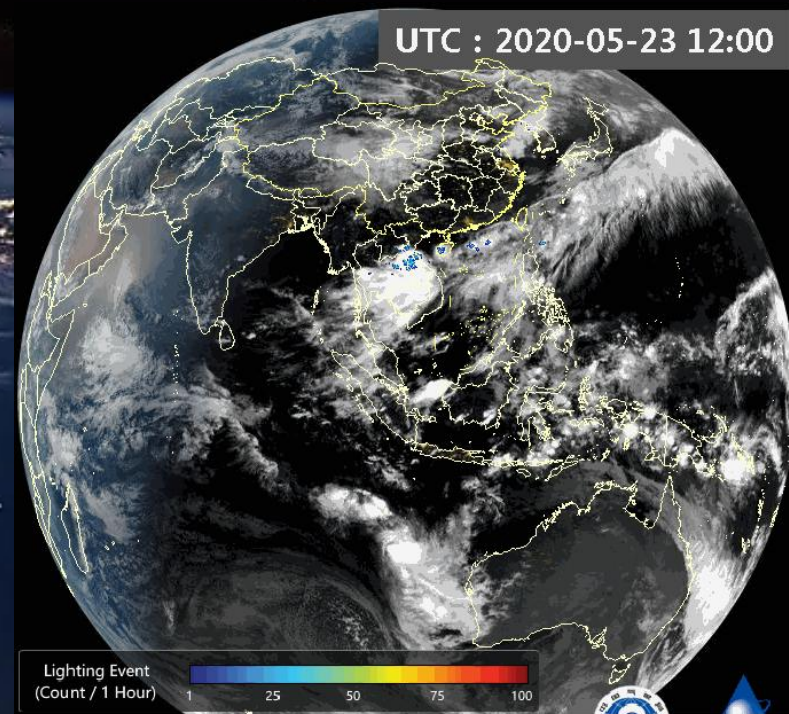
巨大喷流



红色精灵



(2018-2024?)



FY-4A True Color & Lighting Frequency (One hour)



基金委重大项目 “中高层大气环境变异及天气气候致灾效应”

(#42394120)

中层大气化学组分的协同
探测新技术与新方法
中科院大气所 (卞建春)

中高层大气扰动过程的协同
观测及效应研究
中国科大 (陆高鹏)

第一课题
10-30 km, 化学组分
天地空联合 + 多站点联合

高质量观测资料
机理支撑+模式工具

第三课题
新特征、新机制
统计分析 + 数值模拟

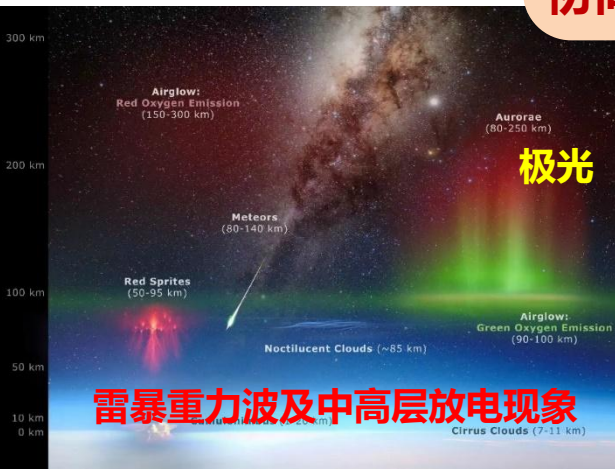
第二课题
30-150 km, 扰动过程及效应
协同观测 + 信号提取 + 机理分析

**中高层大气环境变异
及其天气气候致灾效应**

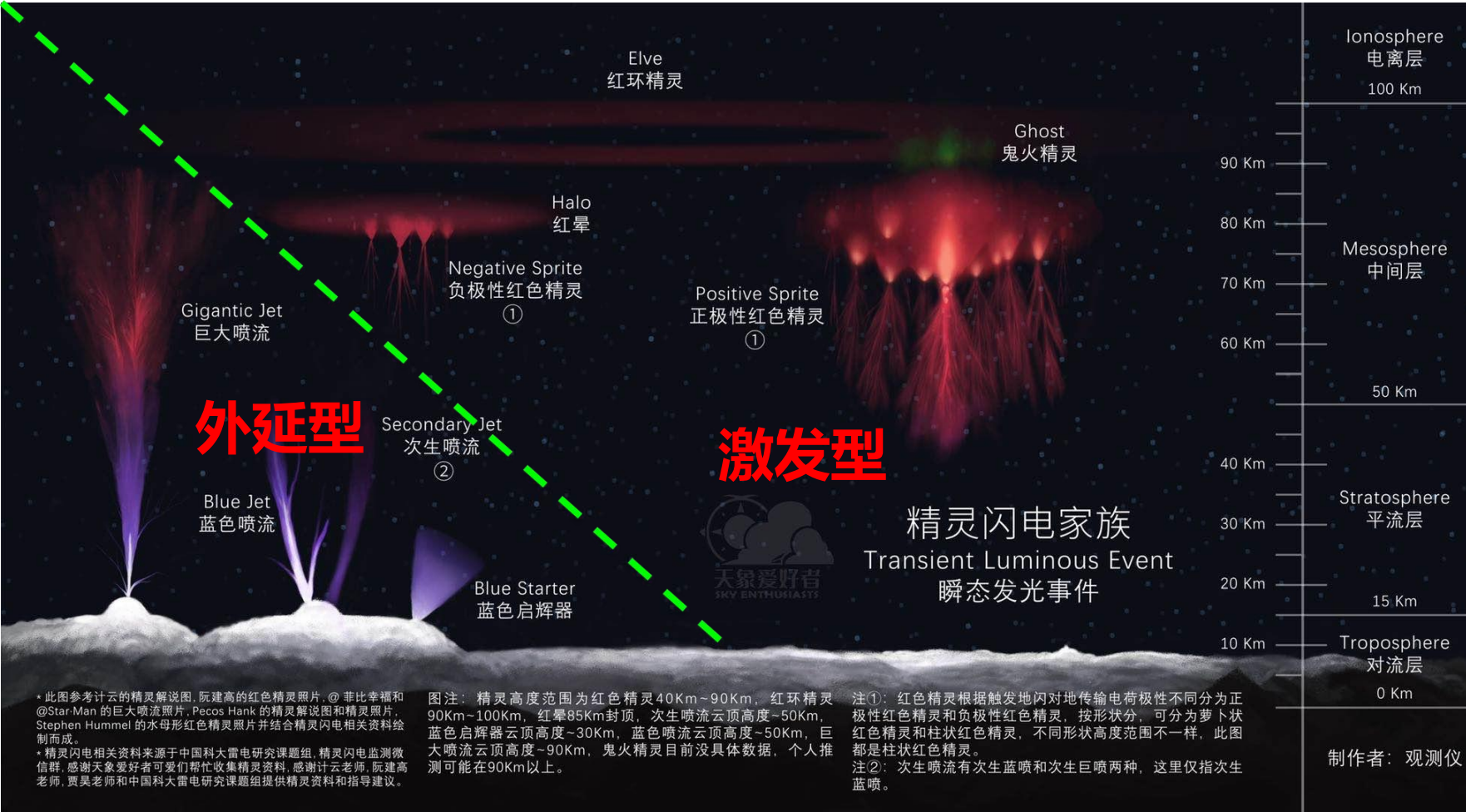
第四课题
模式、同化
参数化方案 + 化学过程

第五课题
应用
致灾效应 + 预报能力

相关研究有非常广泛的群众基础



中高层放电现象（瞬态发光事件）



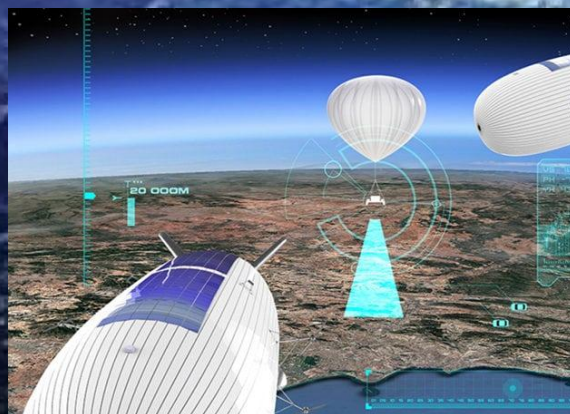
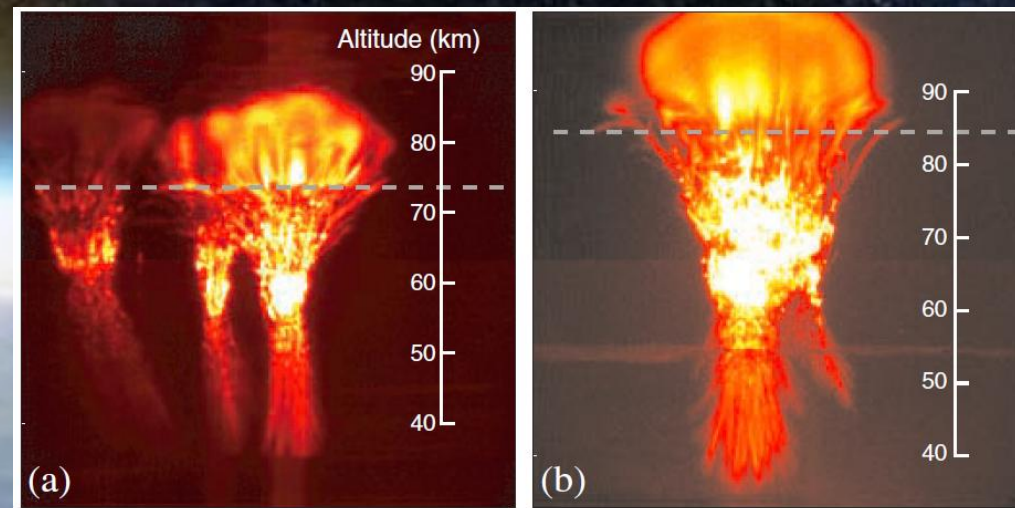
由中国“精灵闪电”爱好者集体制作

“仰望1号”空间天文望远镜看到的红色精灵

为什么要研究中高层放电现象？

临近空间：高度位于20公里到100公里之间的地球大气层

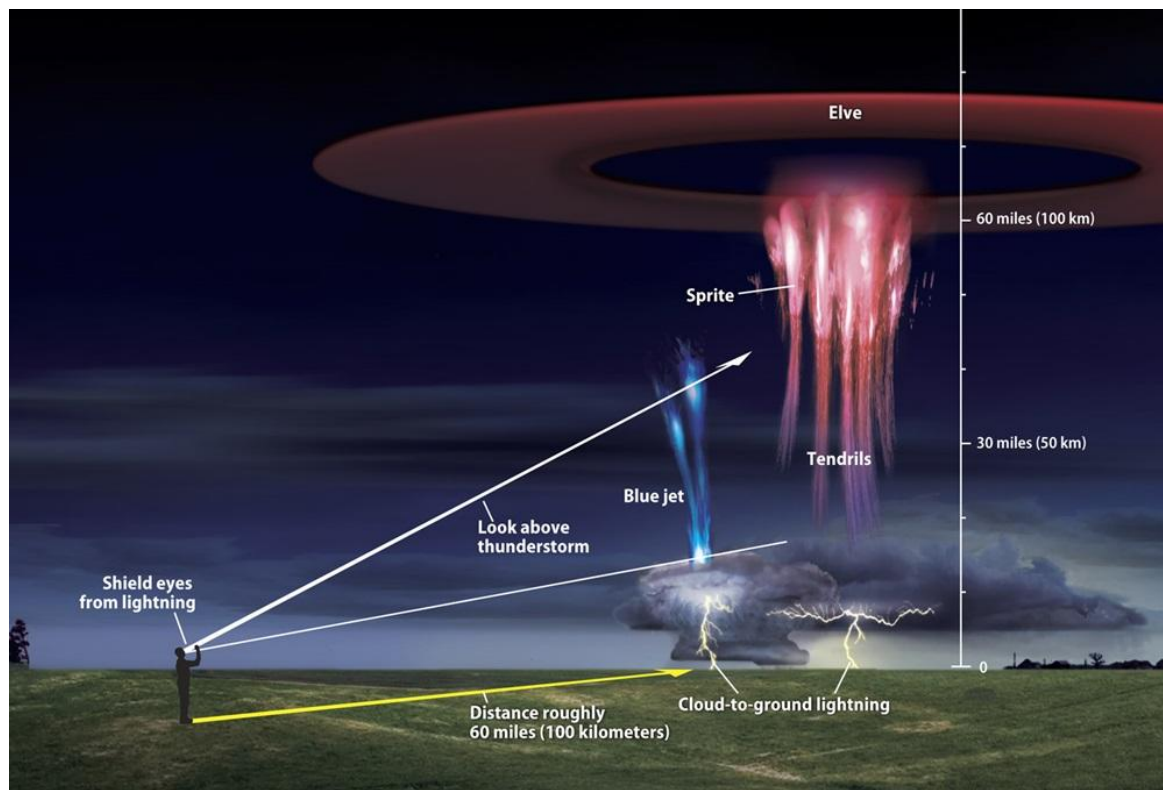
伴随着新一代航空器、浮空器和亚轨道航天器等的发展，临近空间正在成为开展高技术应用和国防安全活动的新领域，运载火箭、人造卫星、载人飞船等航天器以及导弹武器的研究、试验和应用，都需要临近空间气象保障。



- 5倍以上声速
- 超高速飞行引起空气电离放电，成为电磁信号发射源

中高层放电现象的观测

- 远处有活跃的雷暴 (300-600公里)
- 观测点附近没有遮挡视线的云层，城市光污染较少
- 视线方向上空气比较清新，星空可见



双通道成像系统连接示意图





两位资深爱好者（张晓阳、王晋）的观测视场



拟采用的低光度光学观测设备

WAT-3500 1/2.8" Multi-function Compact High Sensitivity Analog B&W Camera

Typical design model with multi-functions in a small body

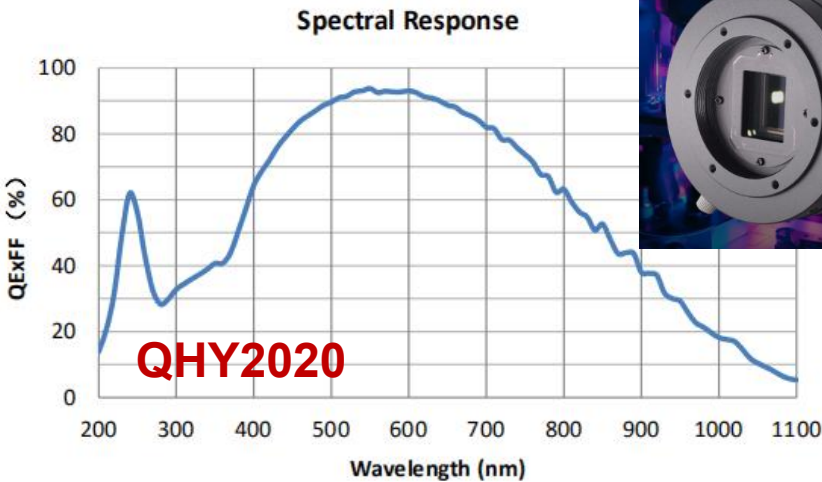
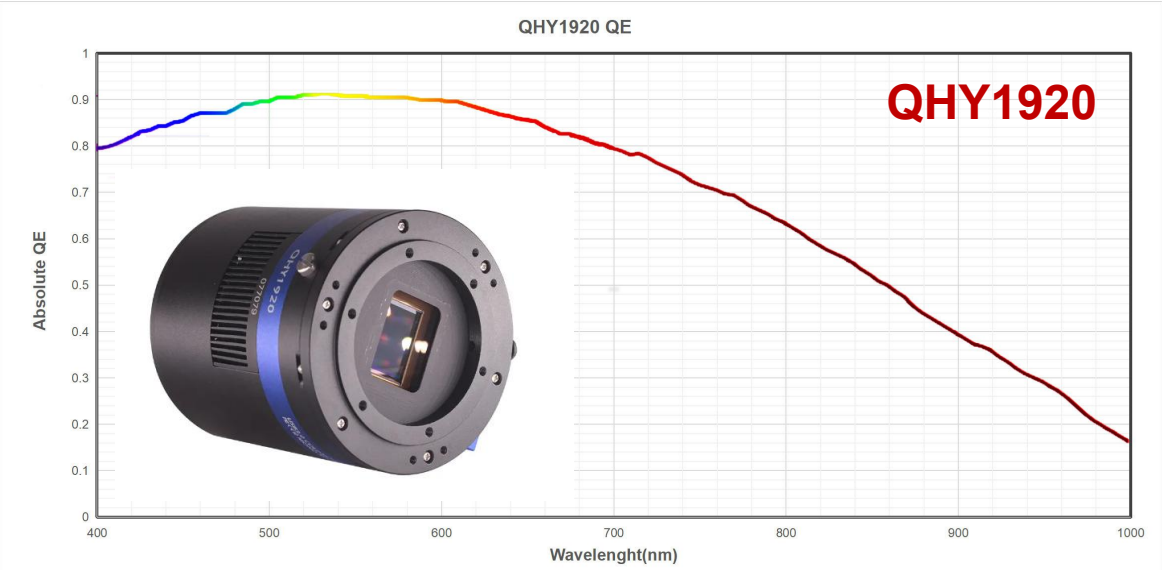
NEW



Specifications

Released in Fall 2023

Video standard	EIA	CCIR
Pick-up element	1/2.8 inch BSI CMOS image sensor	
Number of effective pixels	1945(H) × 1097(V) *1	
Unit cell size	2.9μm(H) × 2.9μm(V)	
Imaging system	—	
Synchronizing system	Internal	
Scanning system	Progressive	
Video output	Composite: 1.0 V(p-p) 75Ω (Unbalanced)	
Setup level	7.5IRE	0IRE
Resolution (H)	More than 570TVL (Center)	
Minimum illumination	0.0001 lx F1.4 (AGC HIGH=72dB, Shutter=OFF)	
	0.000007 lx F1.4 (AGC HIGH=72dB, Shutter=x15)	
S/N	More than 45dB (AGC OFF=0dB, γ=1.0)	





DVXplorer S Duo Smart camera 	DVXplorer Micro Lightweight and compact 	DVXplorer High resolution 	DVXplorer Lite Discover event-based vision 	DAVIS346 Simultaneous events and frames 	DAVIS346 AER Direct interface to FPGA and custom neuromorphic hardware 
---	--	--	---	--	---

Neuromorphic camera, 即**神经形态相机**, 也被称为**事件相机** (Event camera)、硅视网膜 (Silicon retina) 或动态视觉传感器 (Dynamic vision sensor), 是一种模仿人类视网膜将光转化为电脉冲方式的成像传感器。

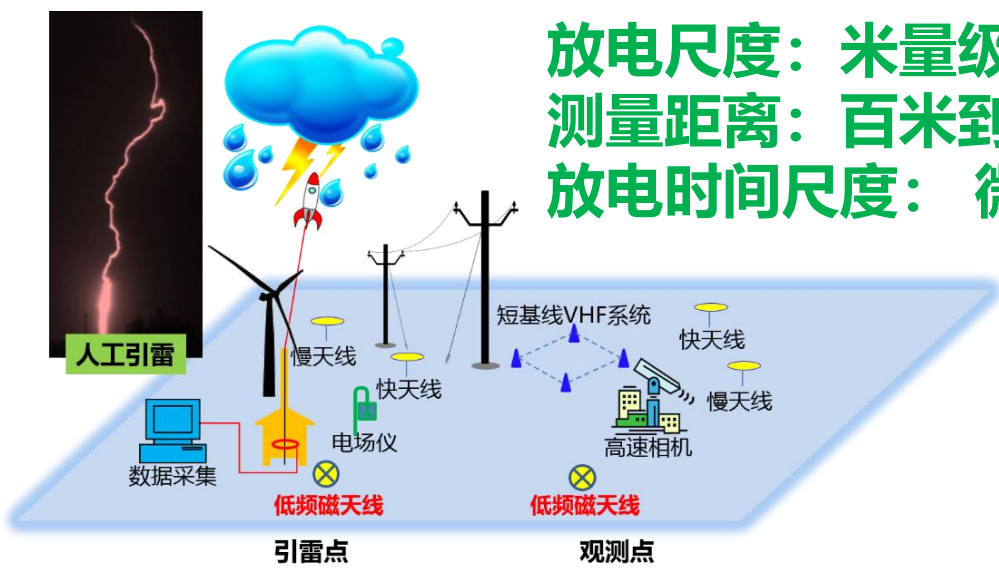
神经形态相机的**每个像素独立且异步地工作**, 仅在其感受到的光强发生变化时才会产生事件或脉冲, 否则保持静默。

夜间的红色精灵观测

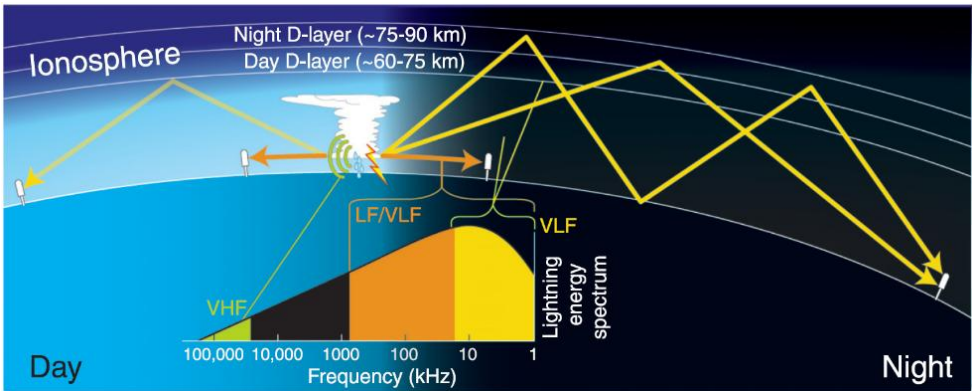


2012年6月16日拍摄于美国堪萨斯州

在四维空间等比例放大



放电尺度：米量级 → 公里量级
测量距离：百米到公里 → 百公里到千公里
放电时间尺度：微秒 → 毫秒量级

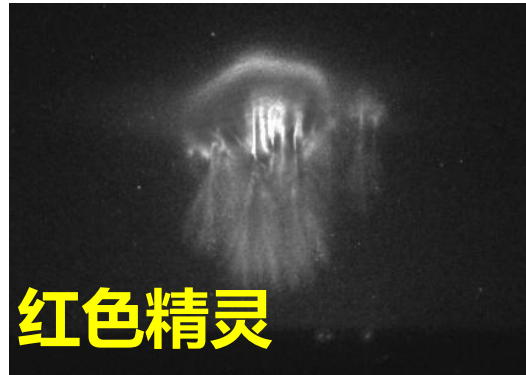
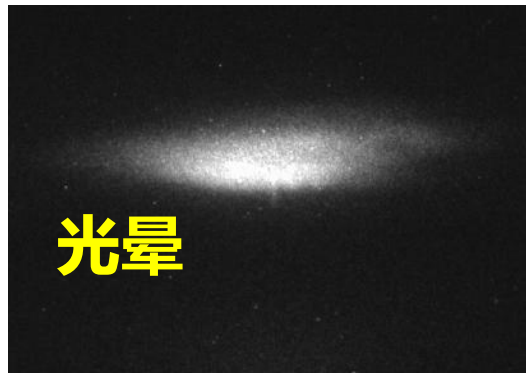
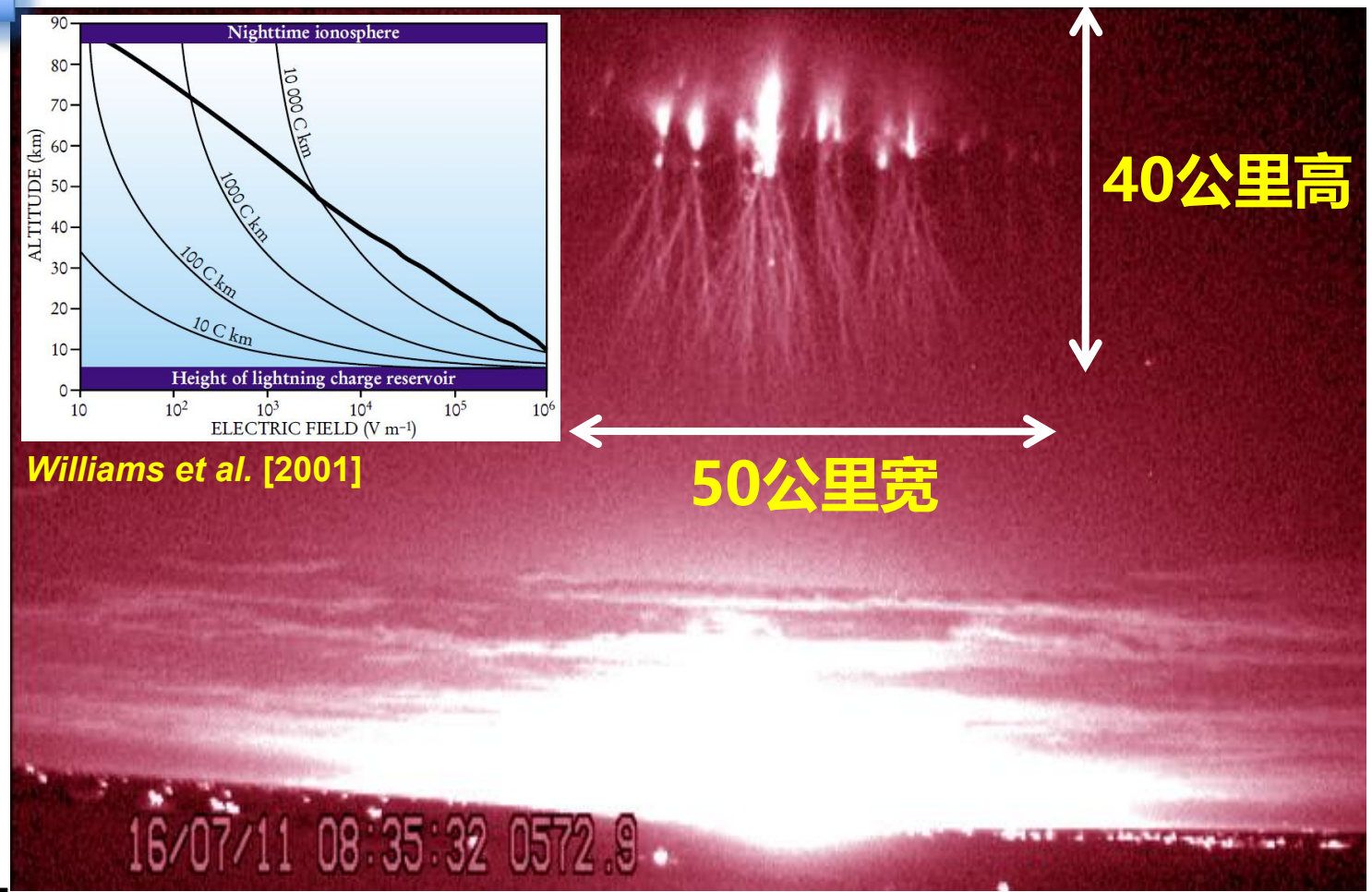
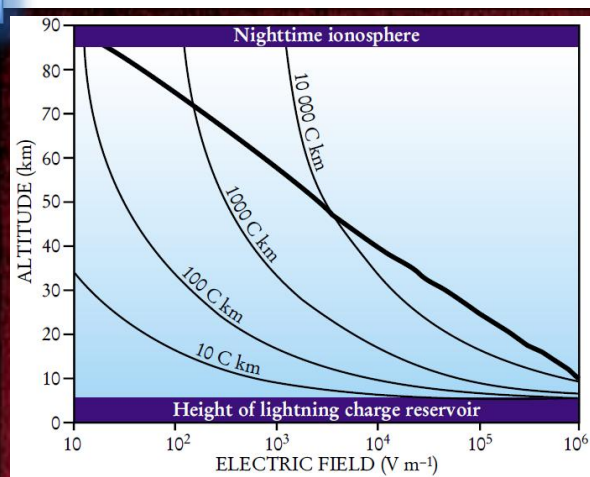
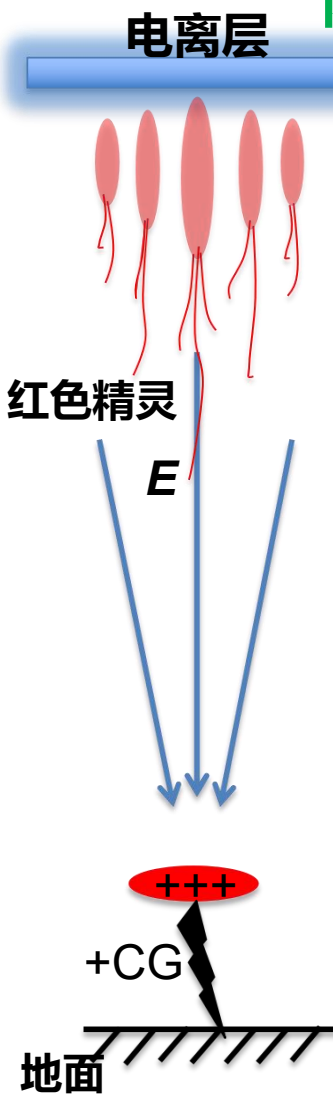


$$B(t) = \frac{1}{2\pi\epsilon_0 c^2} \int_0^h \left(\underbrace{\frac{\sin \alpha(z')}{R^2(z')} i(z', t - \frac{R(z')}{c})}_{\text{感应场}} + \underbrace{\frac{\sin \alpha(z')}{cR(z')} \frac{\partial i(z', t - R(z')/c)}{\partial t}}_{\text{辐射场}} \right) dz'$$

$$E(t) = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \int_0^h \left(\underbrace{\frac{2-3\sin^2 \alpha}{R^3(z')} \int_{t_b}^t i(z', \tau - R(z')/c) d\tau}_{\text{静电场}} + \underbrace{\frac{2-3\sin^2 \alpha}{cR^2(z')} i(z', t - R(z')/c)}_{\text{感应场}} - \underbrace{\frac{\sin^2 \alpha}{c^2 R(z')} \frac{\partial i(z', t - R(z')/c)}{\partial t}}_{\text{辐射场}} \right) dz'$$

红色精灵 (red sprite)-雷暴上空的烟火

闪电对地电荷传输→瞬态激发电场→中高层大气击穿→后继流光发展



拍摄距离: 237公里

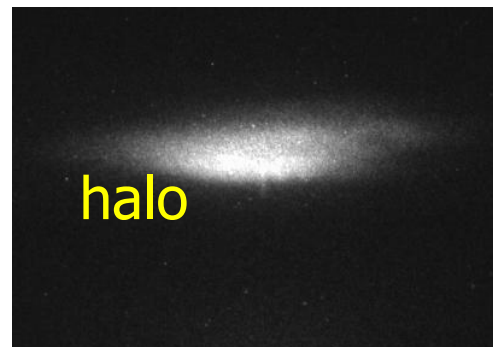
红色精灵的高速光学观测



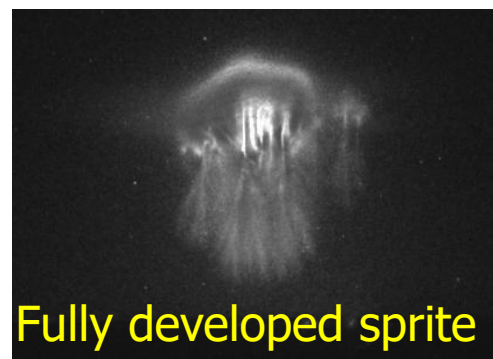
Recorded at 8000 fps by Phantom V711

Obtained by Water Lyons with support from DARPA-NIMBUS Program

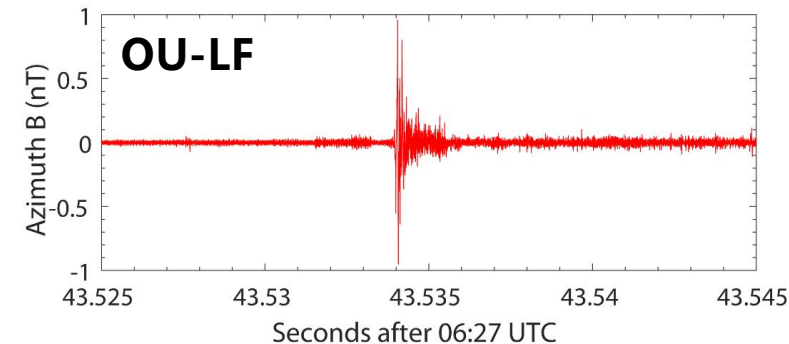
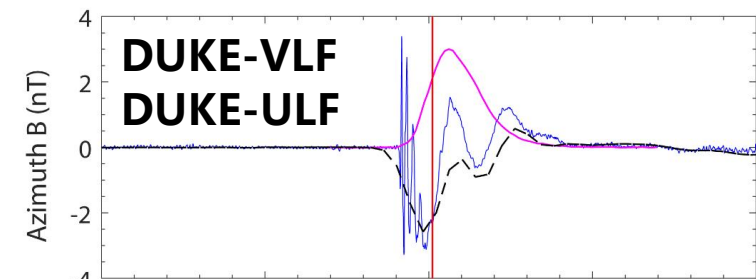
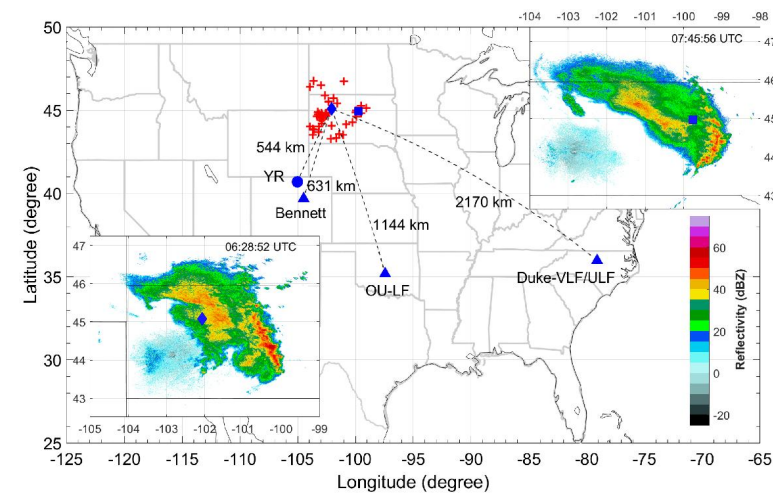
➤ 多频段磁场用于解析不同时间尺度的放电过程



1.5 ms after stroke



3.7 ms after stroke



Ren, Lu et al. (2021GRL)

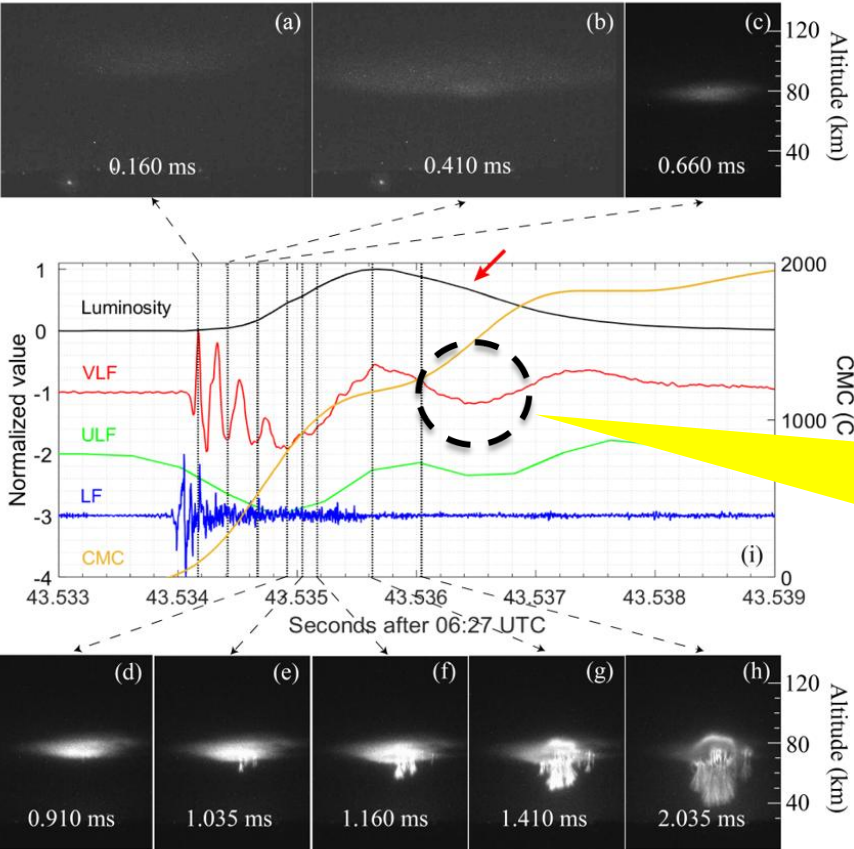
亚毫秒级母体闪电-红色精灵关联性分析

$$E(t) = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \int_0^h \left(\underbrace{\frac{2-3\sin^2\alpha}{R^3(z')} \int_{t_b}^t i(z', \tau - R(z')/c) d\tau}_{\text{静电场}} + \underbrace{\frac{2-3\sin^2\alpha}{cR^2(z')} i(z', t - R(z')/c)}_{\text{感应场}} - \underbrace{\frac{\sin^2\alpha}{c^2 R(z')} \frac{\partial \{z', t - R(z')/c\}}{\partial t}}_{\text{辐射场}} \right) dz'$$

静电场

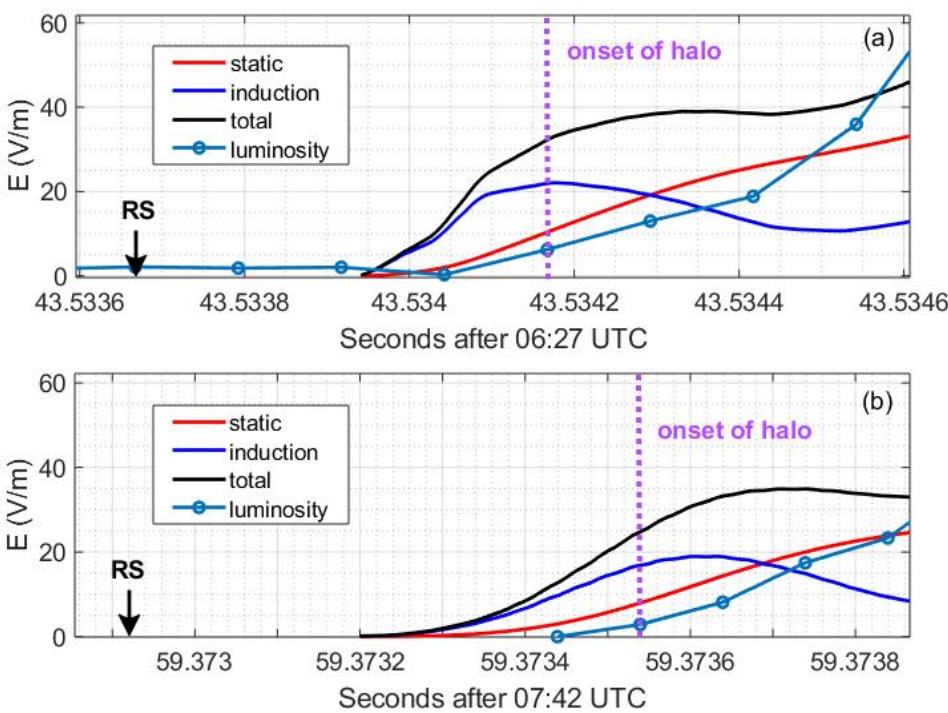
感应场

辐射场



红色精灵自身电流形成的超低频磁场信号

Ren, Lu et al. (2021)

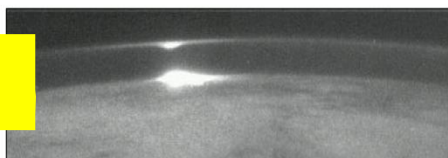


➤ 电流直接相关的感应场分量在光晕的形成中占据主导地位

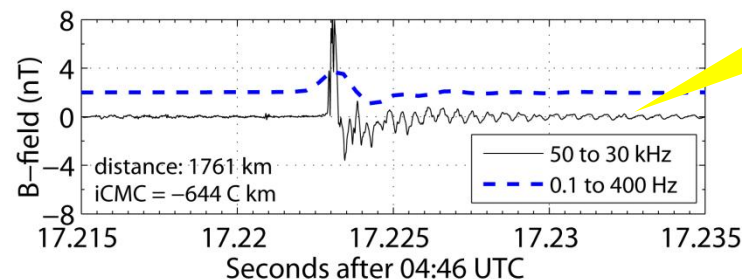
空间平台 (ISUAL) 观测个例

负极性光晕

(a) Pure negative halo



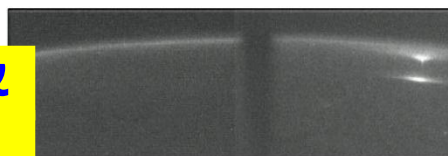
04:46:17 UTC, 10/16/2011



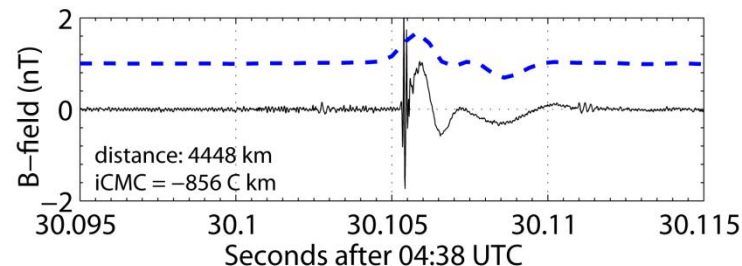
同步宽频磁场信号 (确定雷电极性与强度)

负极性光晕&红色精灵

(b) Negative halo+sprite

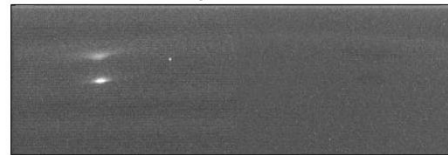


04:38:30 UTC, 04/29/2012

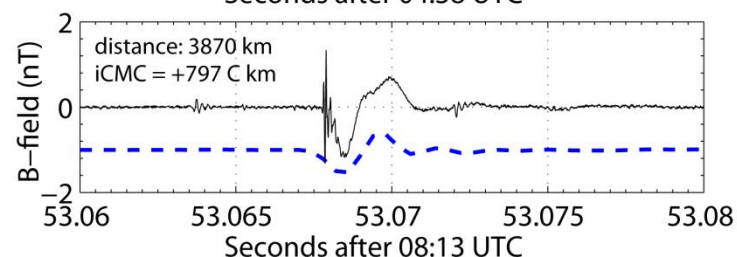


正极性光晕

(c) Pure positive halo



08:13:53 UTC, 03/03/2006

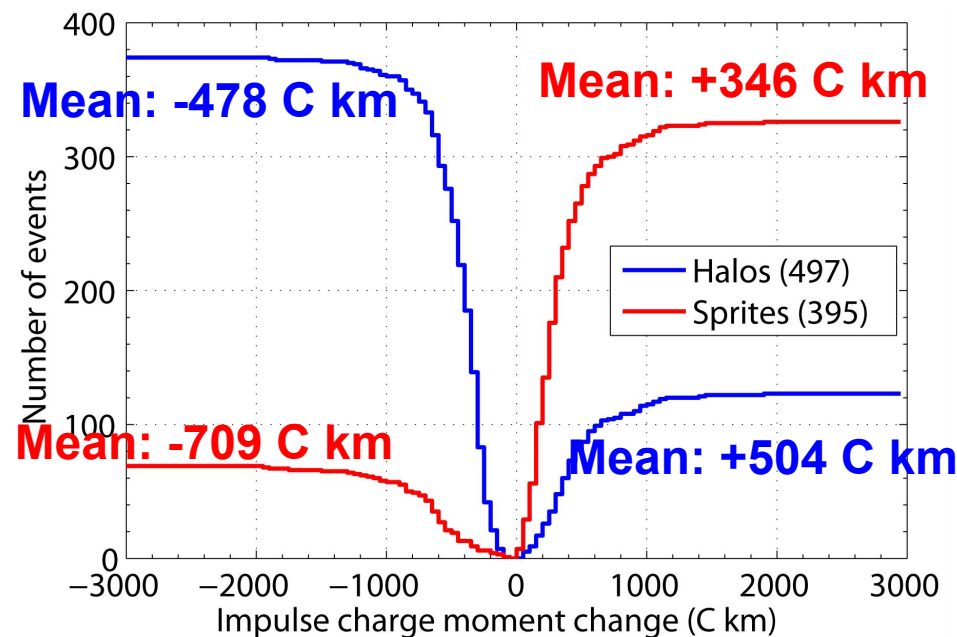
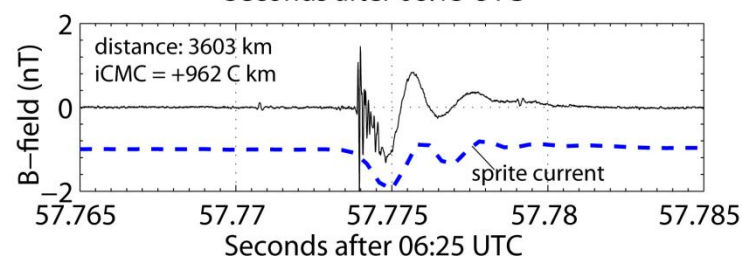


正极性光晕&红色精灵

(d) Positive halo+sprite



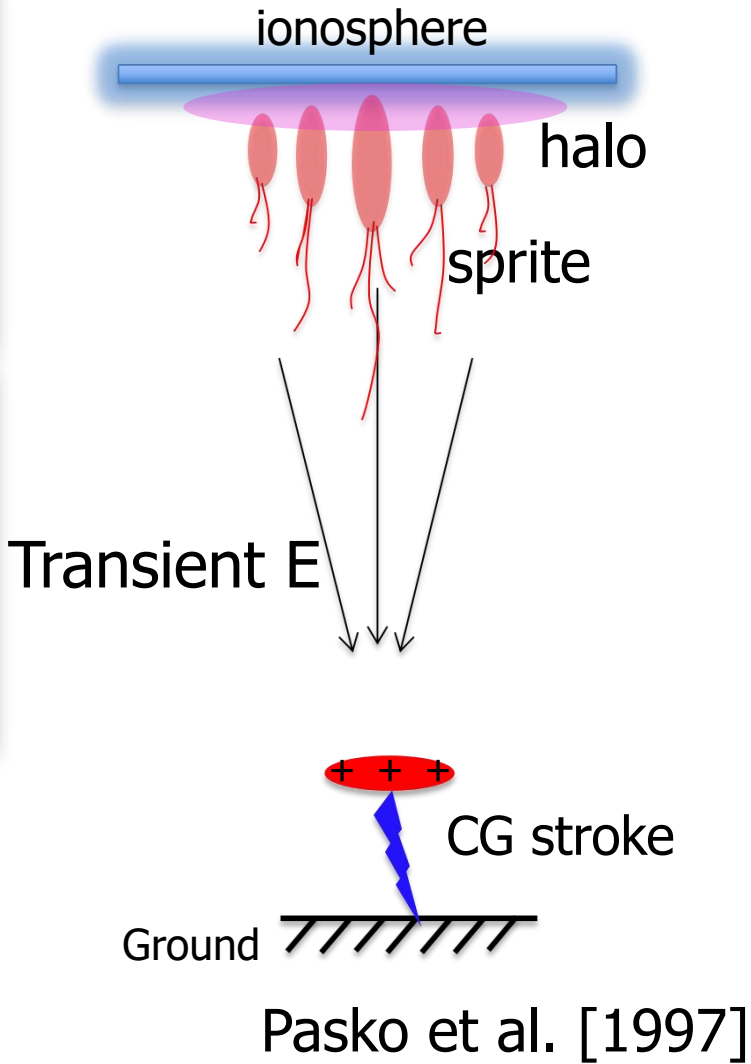
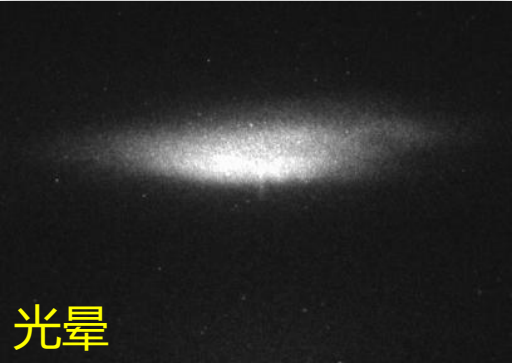
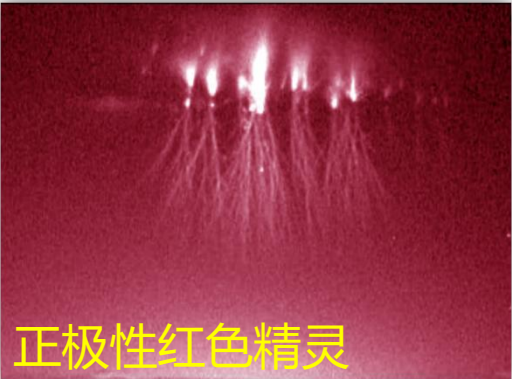
06:25:57 UTC, 07/31/2011



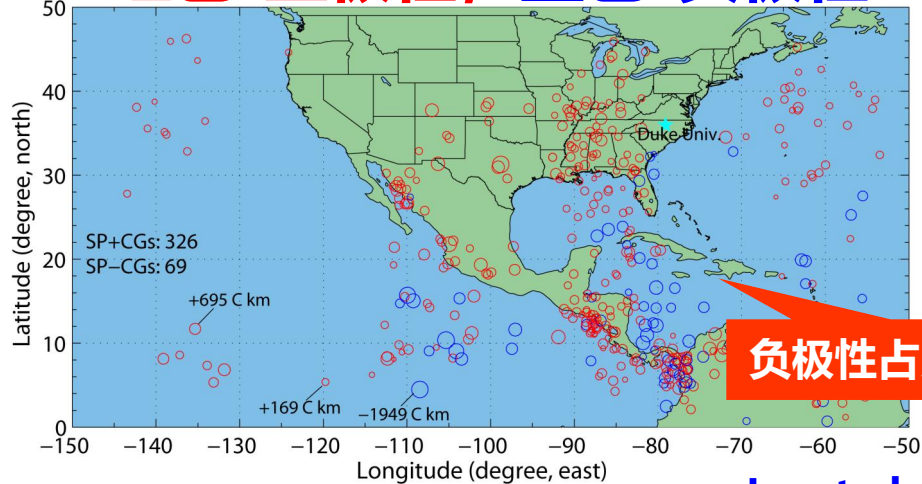
- 光晕的形成没有明显的母体闪电极性依赖性
- 负极性红色精灵的产生需要更大的脉冲电荷矩

Lu et al. (2017)

红色精灵/光晕在海陆地区的主导极性差异

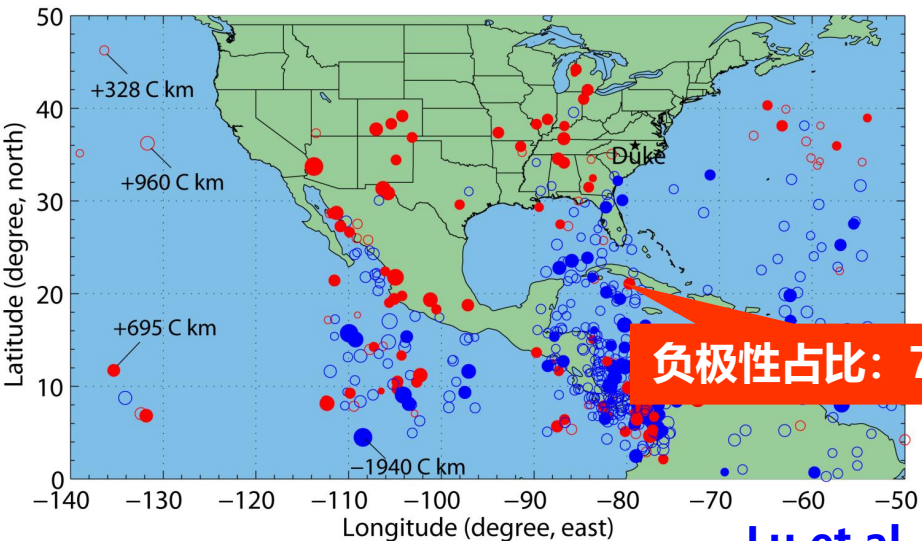


红色-正极性; 蓝色-负极性



负极性占比: 18%

Lu et al. (2017)

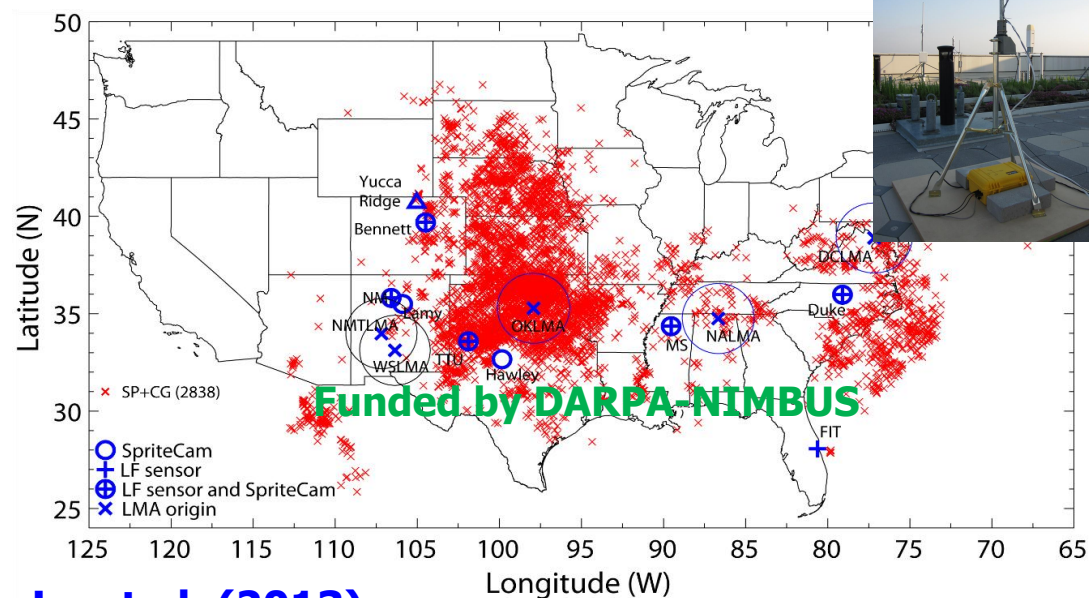


负极性占比: 75%

Lu et al. (2018)

不断扩展的观测数据集

➤ 2009-2013年北美地区地基观测



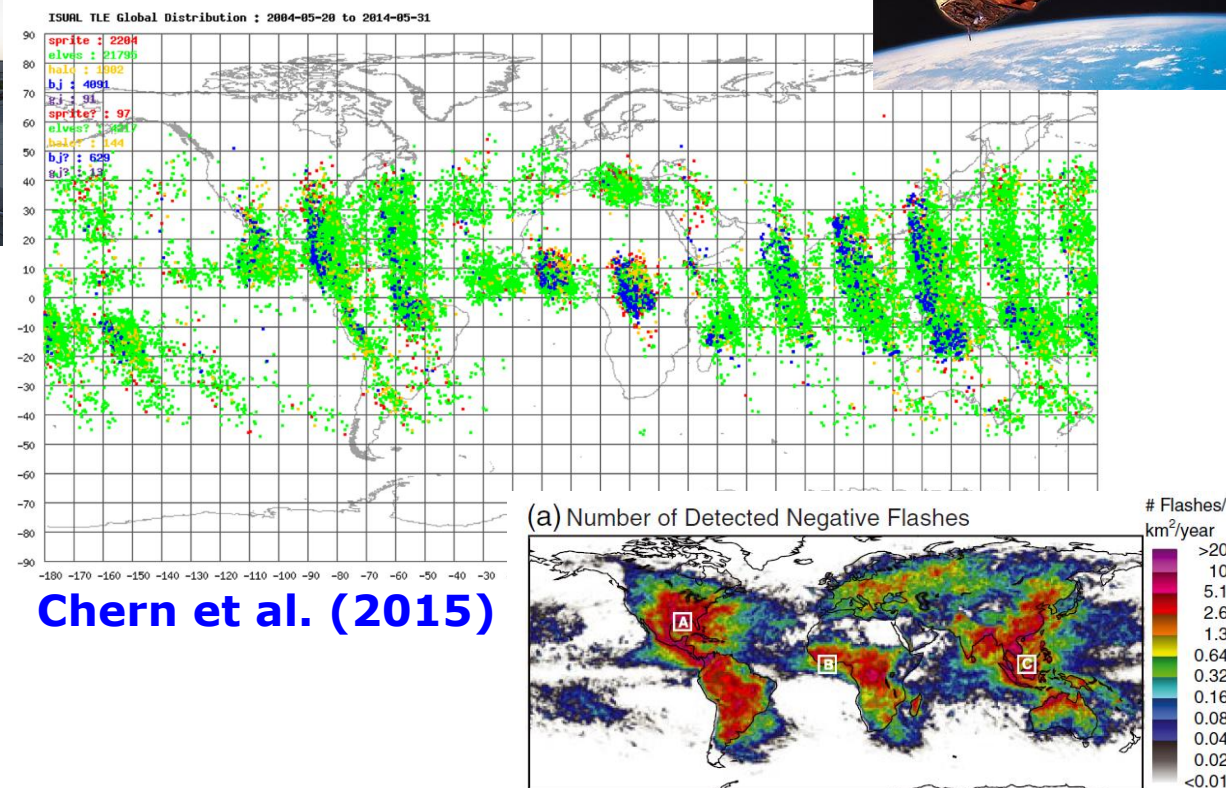
Lu et al. (2013)

- 2800余次中高层放电事件及同步闪电信号
- 负极性红色精灵事件比例大约为0.2%

➤ 2016-2022年东亚地区地基观测

➤ 2016-2022年加勒比海地区地基观测

➤ 2004-2015年ISUAL空间观测

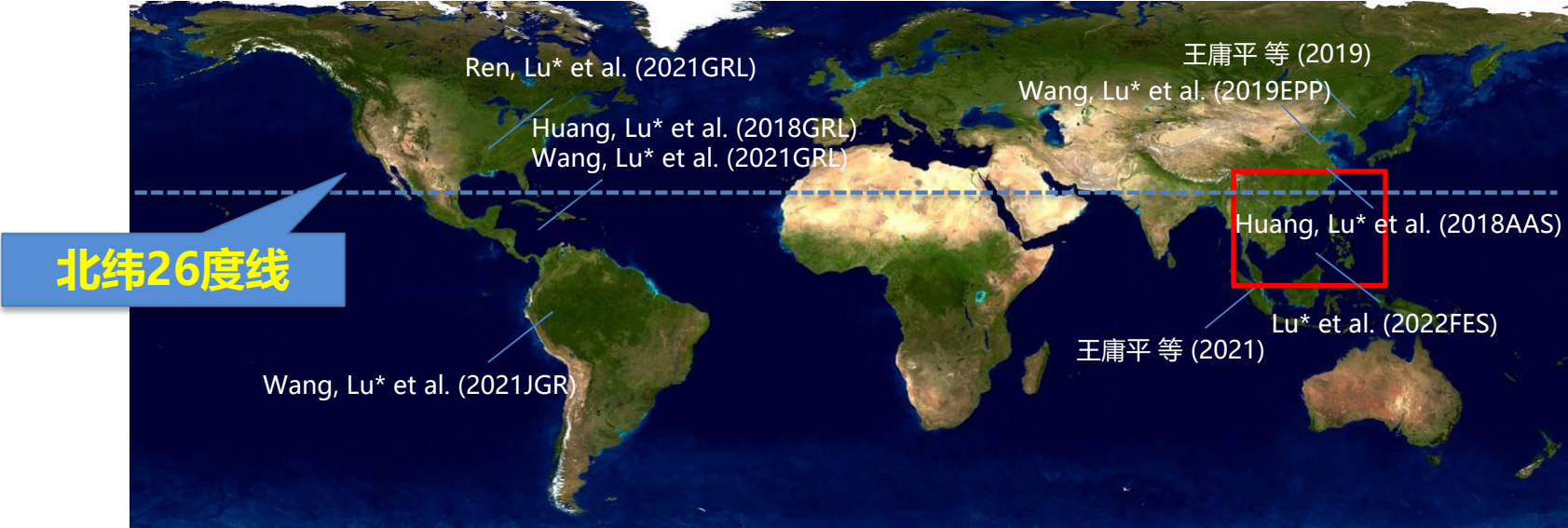


Chern et al. (2015)

➤ 30000余次中高层放电事件观测

➤ 北美地区同步射频闪电信号数据

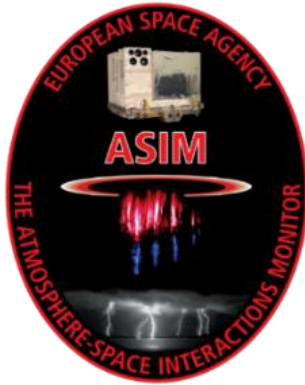
海陆地区雷暴中高层放电现象的对比研究



- 广大爱好者与科学家共同参与
- 地基-空基联合观测结合地基闪电探测



ISUAL (2003-2016)



- AI identification of spatial distribution of red sprites produced by positive/negative CG strokes based on satellite observations

Zhang, Lu* et al. (2022)

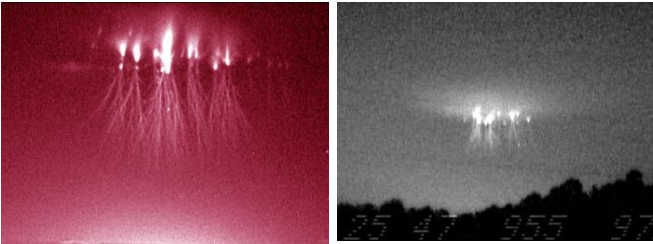
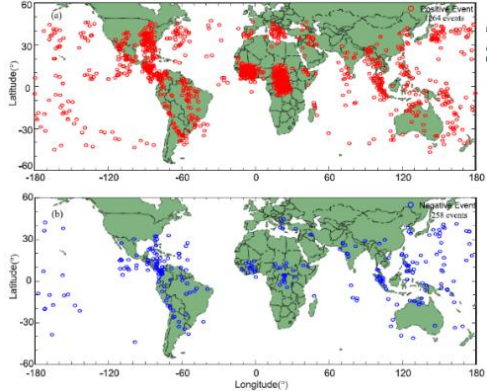
JGR Atmospheres

RESEARCH ARTICLE
10.1029/2022JD036968

Sprite Distribution of Different Polarities From ISUAL Observations With Machine Learning Method

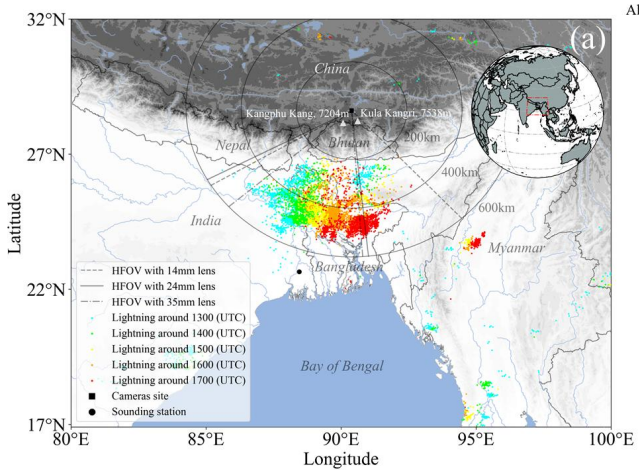
Mao Zhang¹, Gaopeng Lu^{1,2,3}, Ziyi Wang¹, Kang-Ming Peng¹, Hailiang Huang¹, Huan Ren¹, Feifan Liu¹, and Jinhua Lei¹

¹School of Earth and Space Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei, China, ²Key Laboratory of Atmospheric Optics, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Hefei, China, ³Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing, China

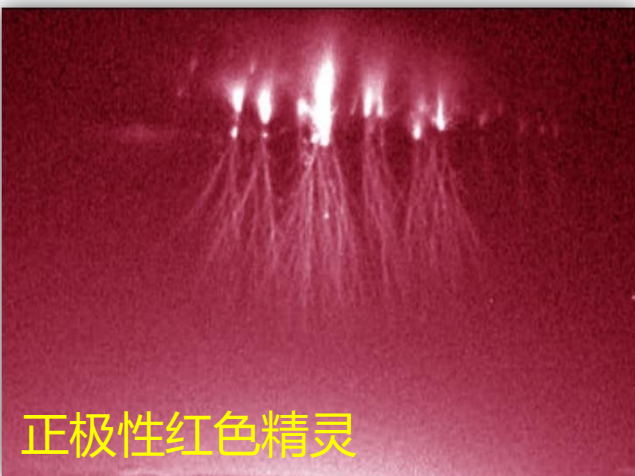
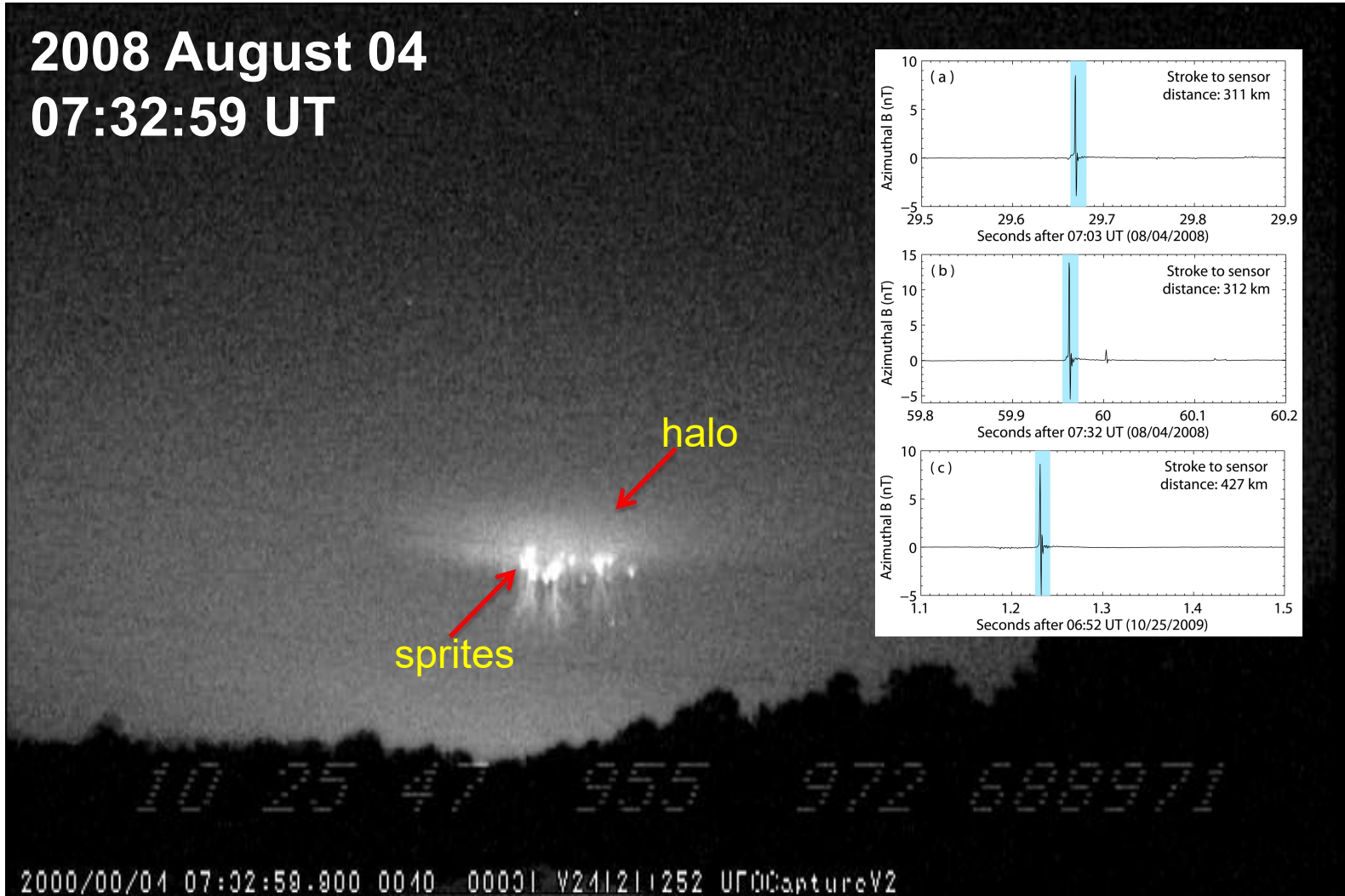


- Ground-based observations of massive TLE production in South Asia

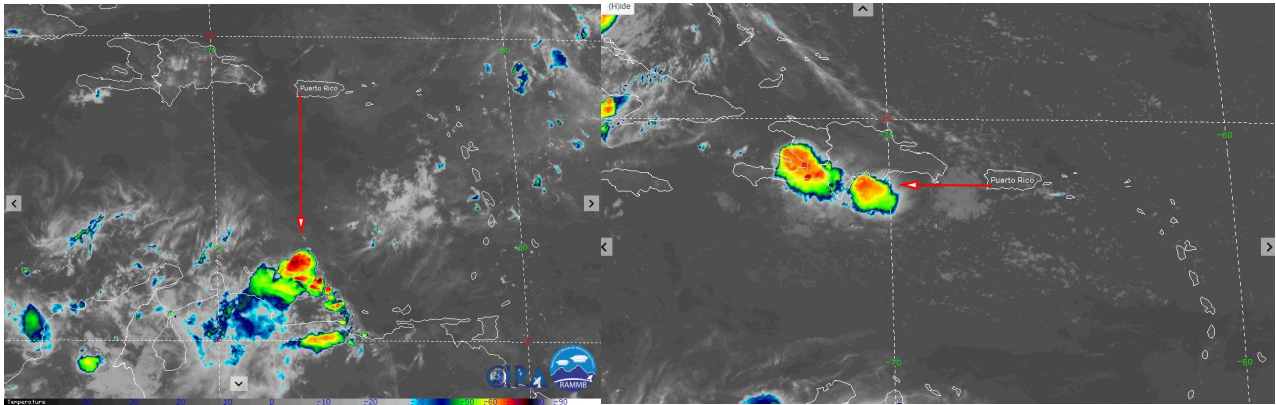
Huang, Lu* et al. (2025AAS)



目前研究重点-负极性 “红色精灵” 及其母体闪电、 雷暴

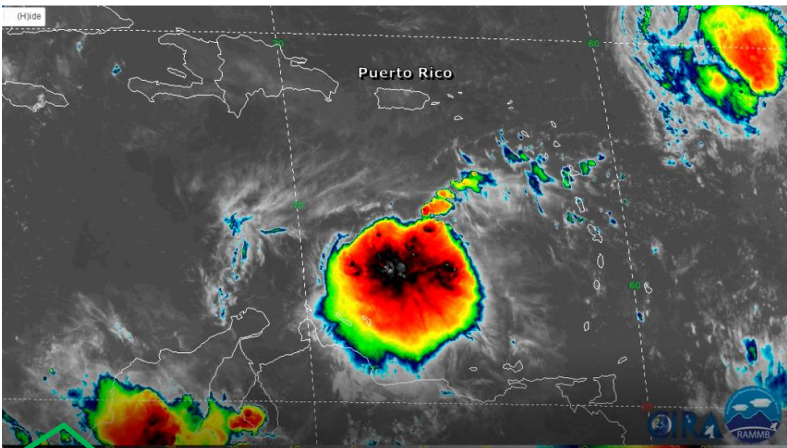


不同海洋雷暴类型产生红色精灵差异-初步结果



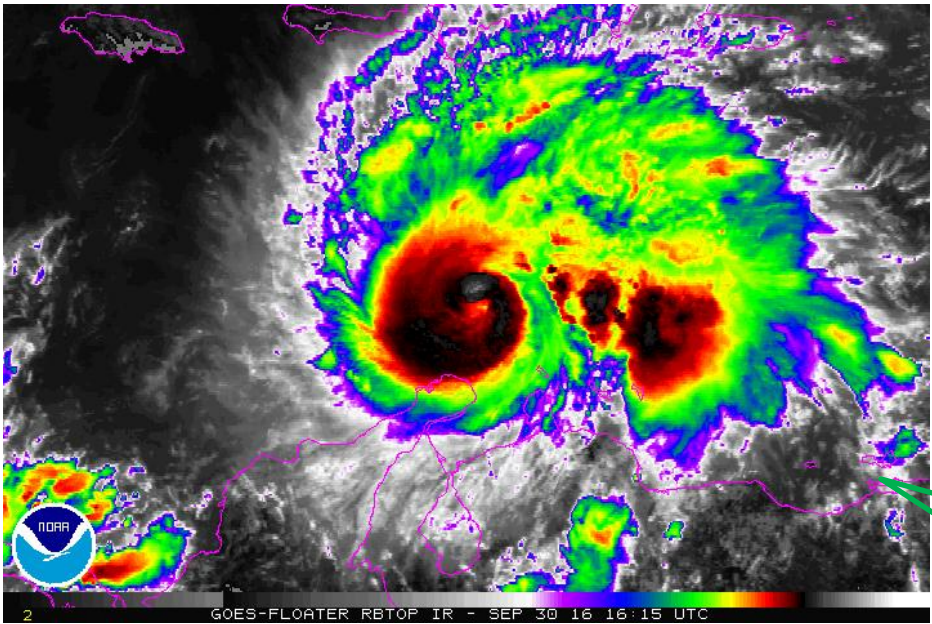
王庸平等 (2021)

海洋小单体雷暴，以产生正极性红色精灵为主（同“两洋一海”赤道地区类似？）



Wang et al. (2021), 爱好者数据

热带风暴主要产生负极性红色精灵，体现海洋雷暴同陆地雷暴的差异



Huang et al. (2018), 爱好者数据

飓风产生红色精灵集中在外雨带，并以正极性为主（类似陆地中尺度对流系统）

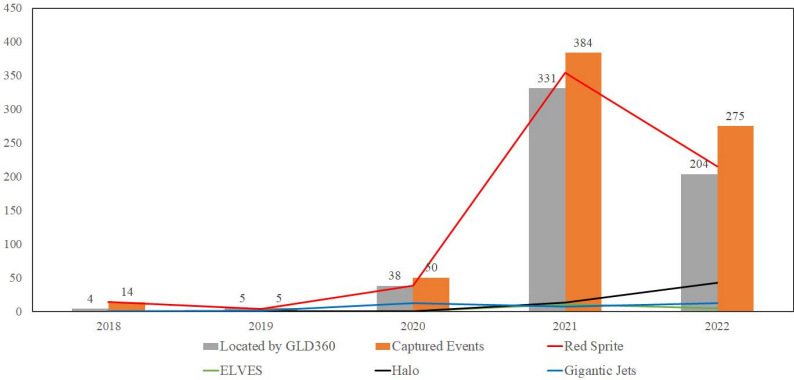
数据积累-2018-2024年地基TLE观测

- 15个省份的爱好者观测到TLEs
- 3个以上稳定监测站点
- 1000+ TLE事件的综合观测数据



雷州半岛追雷记 (18/6-10/7, 2020)

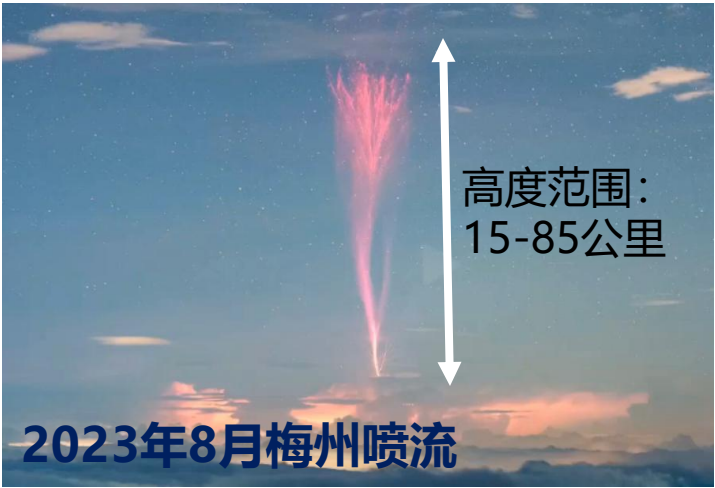
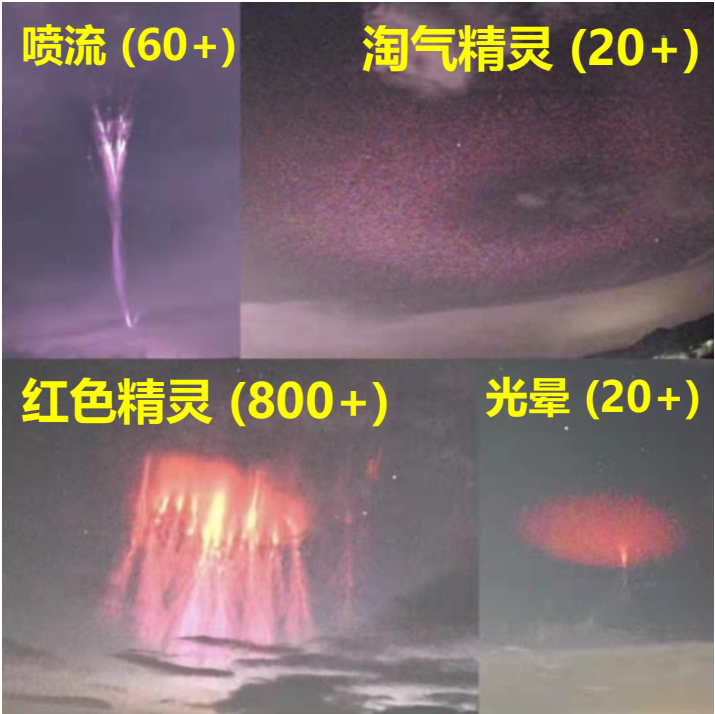
Interannual Variation of TLEs over Southchina



2025-8-4

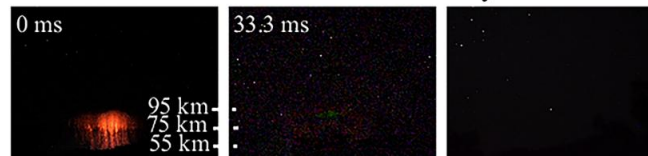


中国北方的极光观测



近期成果-深度电离中高层放电现象的光变特征研究

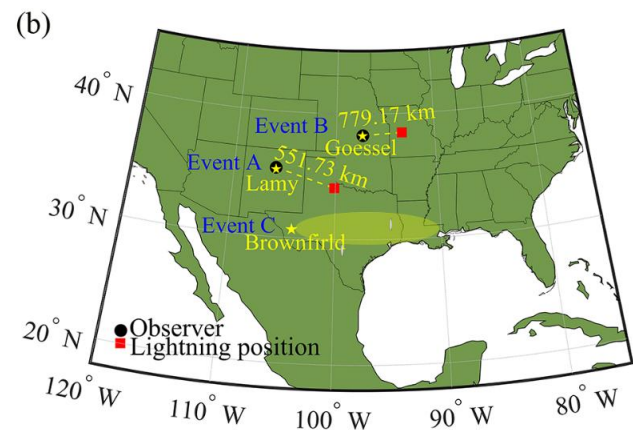
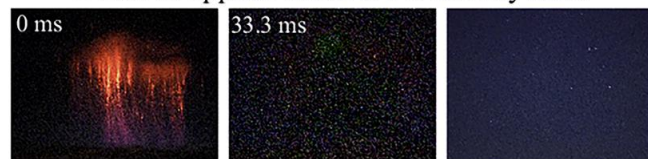
(a) Event A: 03:55:19 UTC 25 May 2020



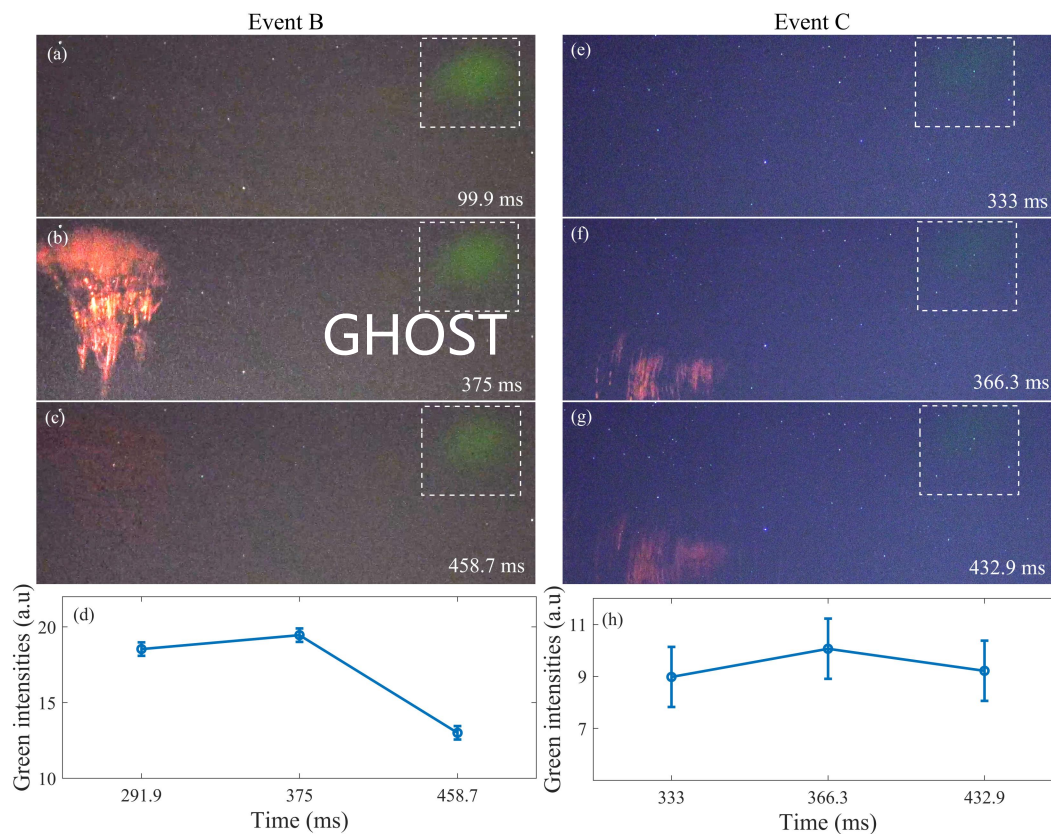
Event B: 07:33:41 UTC 30 Apr 2022



Event C: approx 05:05 UTC 18 May 2019

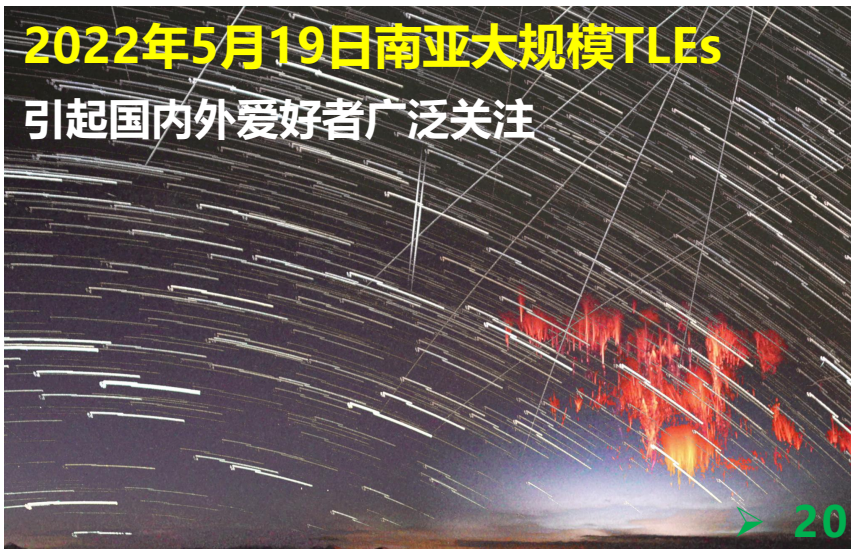


- “绿闪”现象的中心高度在90至95公里之间
- 夜间电离层底部区域“绿闪”现象增强的机制

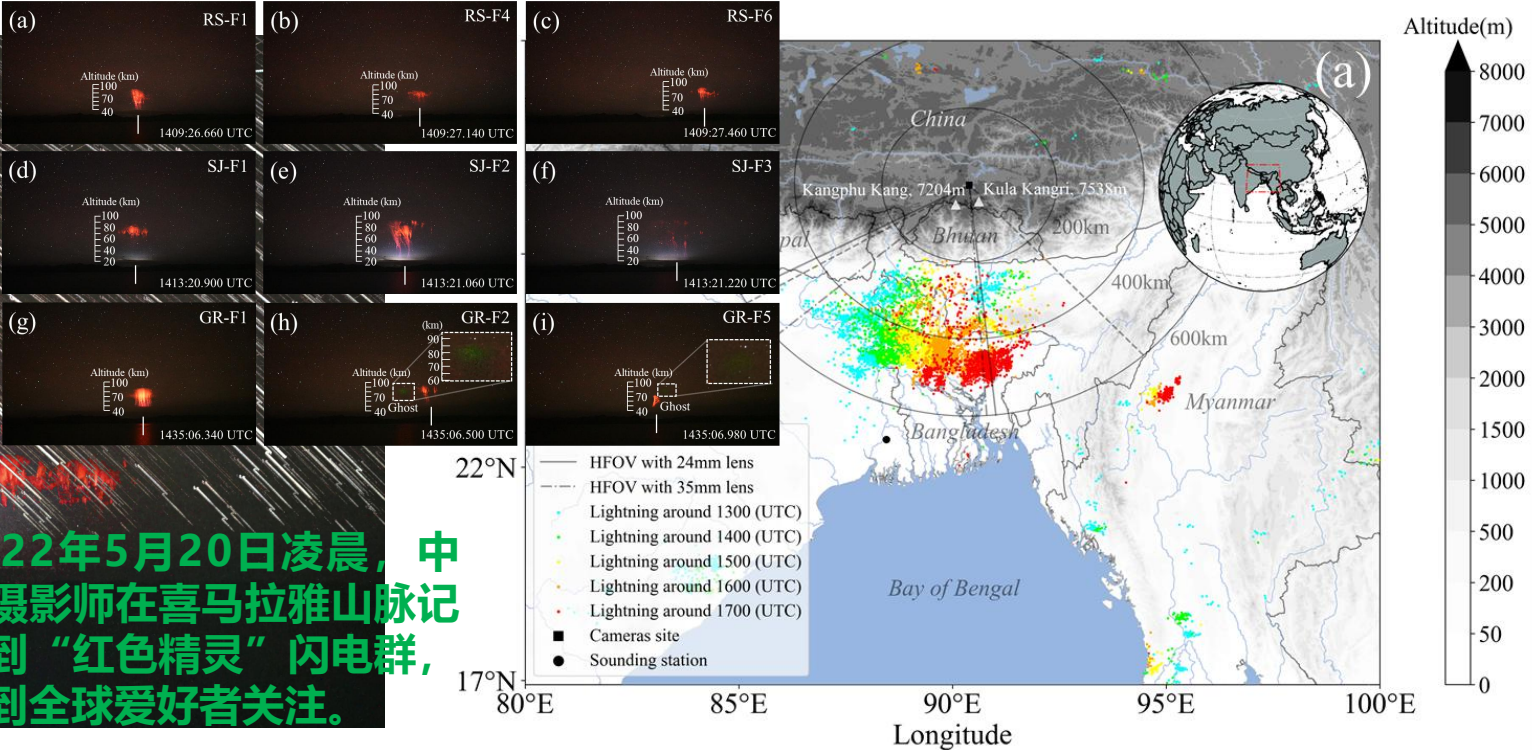
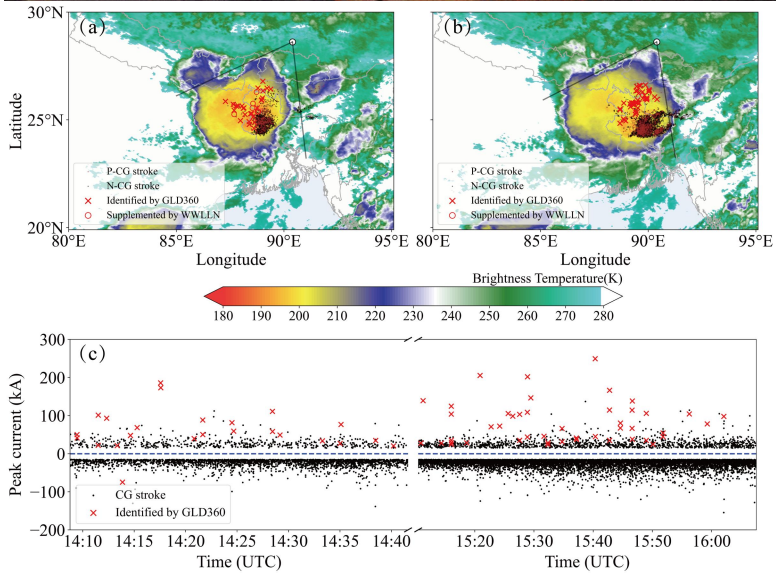


Huang et al. (2024GRL)

近期成果-南亚地区中高层放电现象母体雷暴特征



2022年5月20日凌晨，中国摄影师在喜马拉雅山脉记录到“红色精灵”闪电群，受到全球爱好者关注。



Huang et al. (2024AAS)

- 通过背景场卫星轨迹及星场信息确定瞬态发光事件的准确发生时间
- 南亚红色精灵母体雷暴闪电活动具有明显的“双极性”分布特征

百道红光直冲太空！摄影师助科学家解析“闪电烟花”

■本报记者 高雅丽

2022 年 5 月 19 日深夜，青藏高原普莫雍错湖畔，星空摄影师安久和董书畅的镜头捕捉到一场罕见的“天象秀”——上百道红色光柱从云顶直冲太空，如烟花般在高空绽放。

他们拍摄到的是被称为“红色精灵”的中高层大气放电现象，科学家形象地称之为“闪电烟花”。

此次拍摄的“红色精灵”从何而来？将对临近空间气象产生哪些影响？近日，中国科学技术大学教授陆高鹏团队在《大气科学进展》发表研究成果，确定了两段观测视频中“红色精灵”的发生时间及诱发它们的母体闪电。审稿专家高度评价了该研究方法的创新性，认为“这一方法为众多公民、科学家参与科学观测提供了可靠的校时手段”。

从“偶然发现”到科学突破

“红色精灵”最早在 1886 年被预言，直到 1989 年 7 月 6 日，时任美国明尼苏达大学物理学教授 John R. Winckler 利用一台低光度摄影机记录了一道夜空中跳跃的火焰，才揭开它的神秘面纱。

陆高鹏解释说，“红色精灵”这种中高层大气中的放电现象，是由雷暴强烈的放电活动引发的。这些现象在稀薄的大气中发生，与云层大气中的闪电不同，它们可以在持续的电场作用下加速并击穿空气，形成壮观的放电现象。

“这种现象在地球的中高层大气中很少



精灵烟花。 安久、董书畅 / 摄

拍摄的 3 个多小时里，“红色精灵”非常密集，每隔一两分钟就会出现一次。不仅有四个“红色精灵”同框的时刻，还出现了巨大喷流。

长期以来，“红色精灵”研究集中于北美大平原等雷暴高发区。在这种认知框架下，南亚地区并不是具备强雷暴发展条件的典型区域。然而，此次发现颠覆了传统认知。

“大家认为丘陵地貌不利于大尺度雷暴系统的形成，因为对气流的切割作用会引起能量分散。平原则能够有效维持气流的水平输送与能量聚集，从而更易形成大规模雷暴系统。”陆高鹏说。

陆高鹏团队分析发现，本次“红色精灵”母体闪电主要为大峰值电流的正极性闪电，发生在从恒河平原延伸至青藏高原南麓的中尺度对流复合体层状云降水区。

“这次研究观测记录了南亚单次雷暴过

当爱好者成为“精灵捕手”

这次摄影师拍摄到了上百个“红色精灵”，其中不少是跃动的“舞蹈精灵”，还有罕见的“次生喷流”，以及亚洲首例夜间电离层底部绿色发光现象“鬼火精灵”。

这些丰富的记录，为陆高鹏团队的后续研究提供了完整素材。不过，获取视频后，团队遇到了一个难题——普通相机没有精准的时间标记，加之相机没有放平，对于后续的数据分析十分不利。

对此，团队提出基于卫星轨迹与星场推断视频时间的方法。通过分析照片中的卫星轨迹和恒星位置，将爱好者拍摄的无时间标记视频精确校准至毫秒级，实现了“红色精灵”与母体闪电的精准匹配。

“我们相当于用星空时钟重建了闪电事件的时间坐标系。”陆高鹏表示。

他告诉记者，研究中超过 80% 的观测数据都是由民间摄影爱好者提供的。他们在一个名为“精灵闪电观测”的微信群里分享拍摄到的影像，构成了科研团队的“分布式观测网”。

同时，陆高鹏在科研中不仅进行了雷电知识科学普及，还探索出一条特色路径，将公众的非结构化数据转化为科研资产。

摄影师凭借此次拍摄的作品获得英国格

能对中高层大气化学环境产生深远影响，为应对气候变化、保障航天安全提供全新视角。

“我们关注的不仅仅是这些现象本身，还在于它们对大气环境的影响，以及与极端天气事件产生的关联。”陆高鹏说。

陆高鹏解释说，中高层大气放电会产生臭氧，而臭氧在平流层中有益，但在对流层中有害。研究团队正在探索这些现象是否会导致区域性气候效应，甚至可能引发灾害性天气。“我们希望通过研究这些现象，为气象预测和气候研究提供新视角。”

此外，“红色精灵”等中高层大气放电现象还会影响临近空间气象环境。伴随新一代航空器、浮空器和亚轨道航天器等的发展，临近空间正在成为开展新技术应用和国际

.....popularize science of lightning in research, and explore a unique way to turn unstructured data from public into the source of research.

物理动信号。

“我们希望通过光电遥感技术，突破观

优势，为 DNA 信息存储技术的广泛应用奠定了基础。

相关信息：

发现·进展

天津大学

科研人员开发全新 DNA 存储系统

本报讯(记者陈彬 通讯员赵晖)近日,天津大学应用数学中心教授吴华明团队开发一种全新的 DNA 存储系统——HELIX,专门用于存储生物医学数据,并成功实现了 60MB 的时空组学图像的存储与恢复。相关研究论文发表于《自然—计算科学》。

随着信息技术的飞速发展,传统存储方式已无法满足大数据时代的需求。在此背景下,DNA 信息存储技术应运而生。利用 DNA 分子存储数据被视为未来大规模数据存储的潜力介质。每克 DNA 能够存储数百万字节数据,并且在无需电力的情况下保存数千年。尤其在生物医学数据领域,DNA

中国科学技术大学

工程博士学位论文



非结构化数据融合在中高层大气放电现象研究中的应用

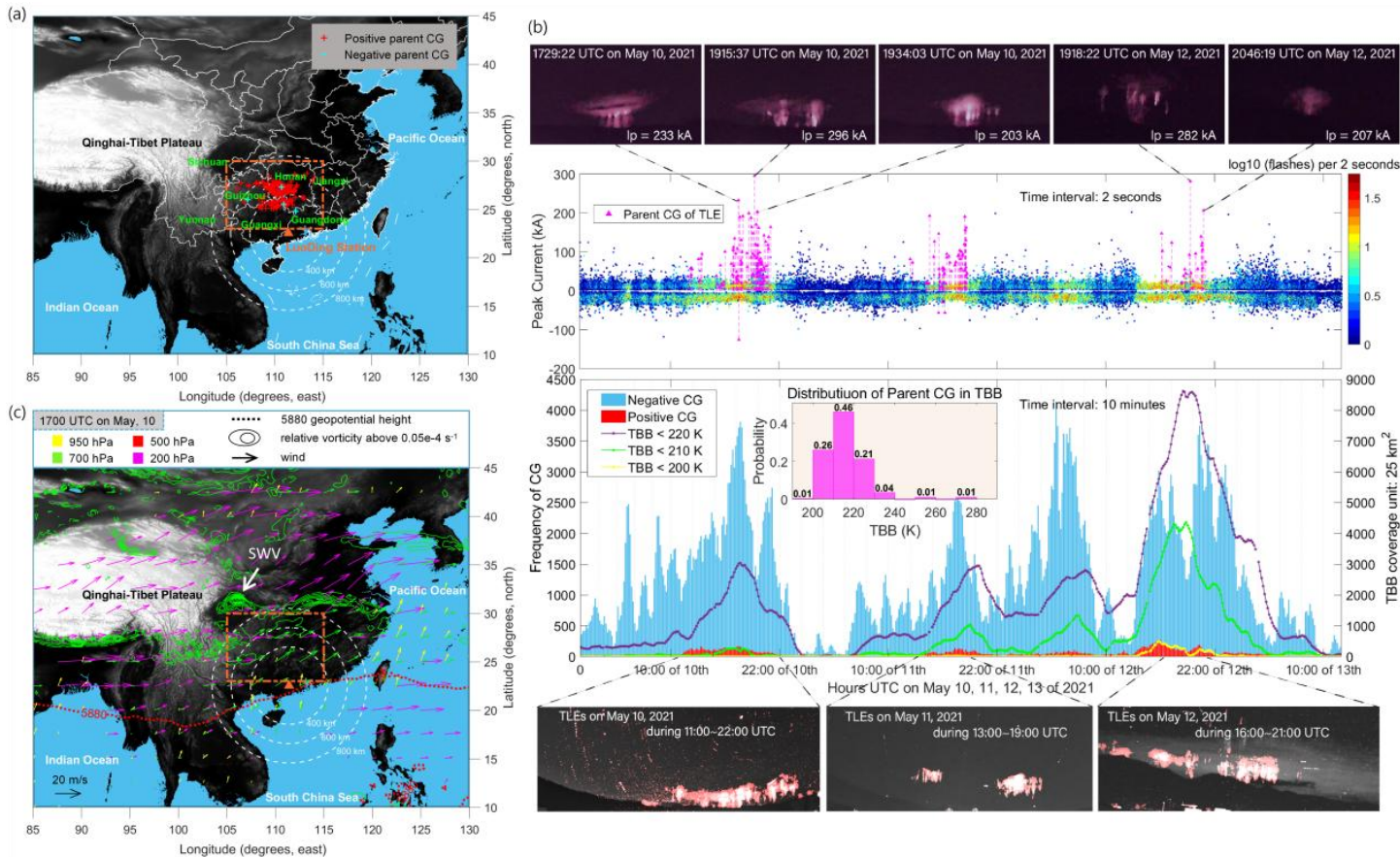
作者姓名： 黄海亮
学科专业： 资源与环境
校内导师： 陆高鹏 教授
实践导师： 吕伟涛 研究员
完成时间： 二〇二五年四月一日

- 提供基层社会服务
- 服务地球科学宣传
- 服务中国科大招生



雷暴个例: 2021年5月10-12日中南地区大规模精灵爆发

➤ 迄今为止东亚地区最大规模的单次天气过程TLE观测



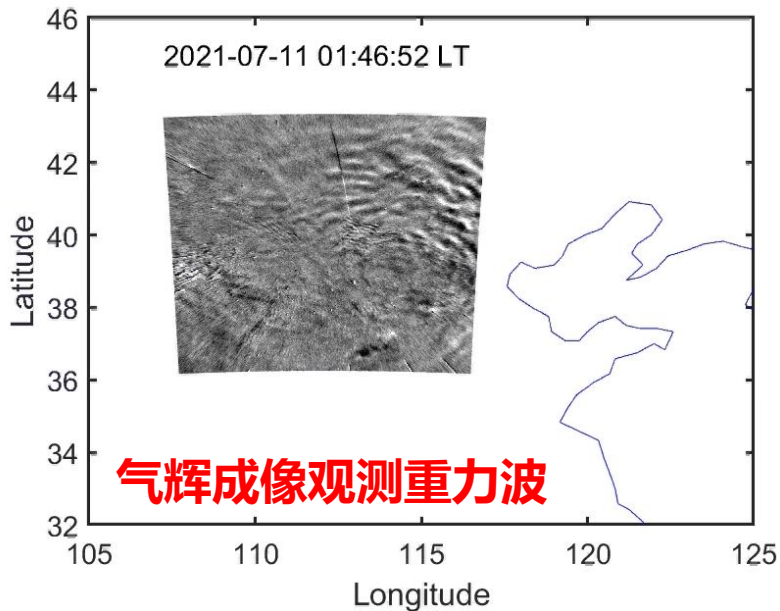
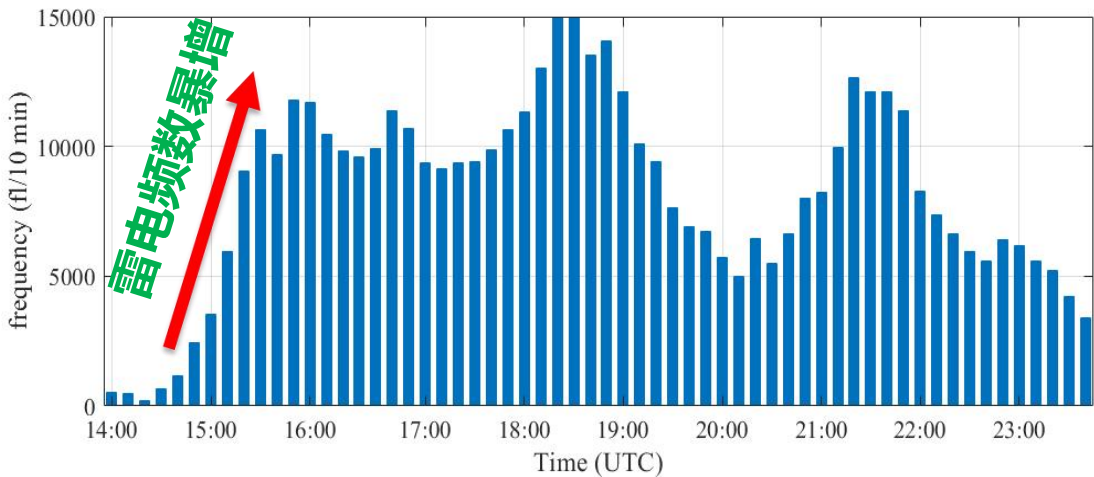
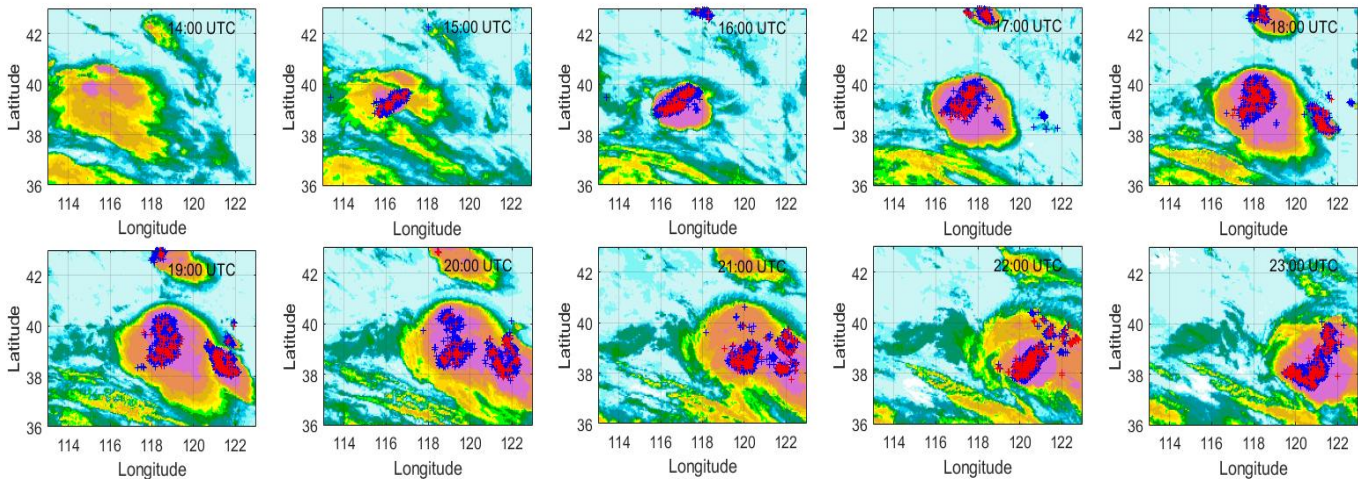
共计记录到166次中高层放电事件

- 西南涡持续触发能够产生中高层放电现象的母体雷暴
- 红色精灵相应于夜间增强的正地闪过程

华南前汛期推迟与中南地区红色精灵持续爆发是否有关?

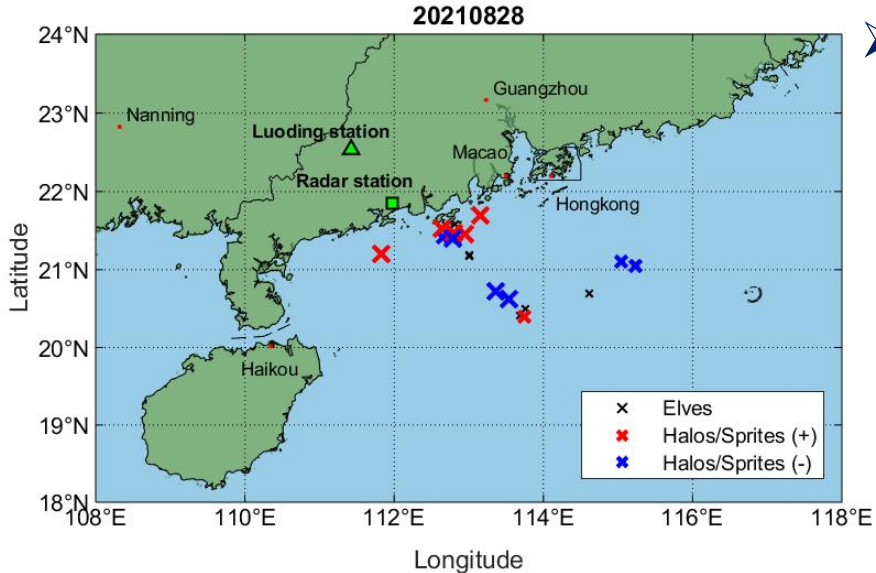
雷暴个例：2021年7月11日凌晨京津冀地区强对流过程

➤ 基于雷电探测的重力波事件预测

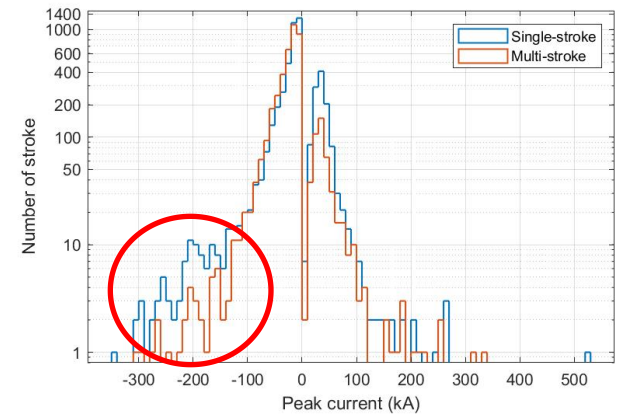
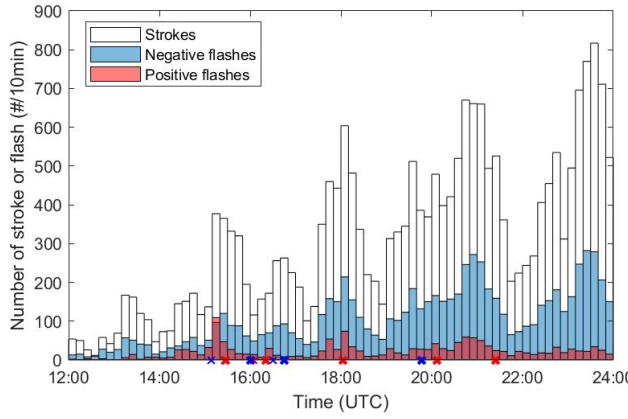
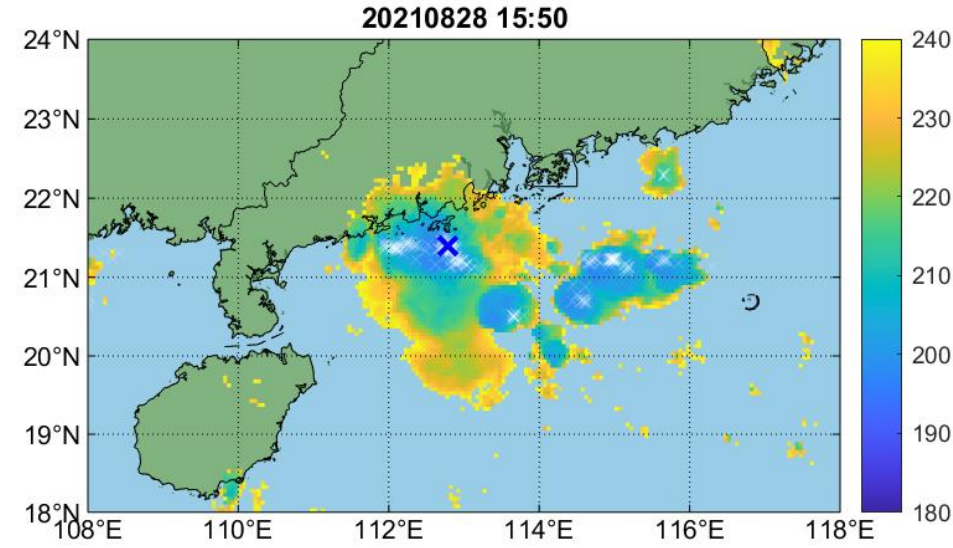


长时曝光观测重力波

雷暴个例：2021年8月28日广东沿海雷暴

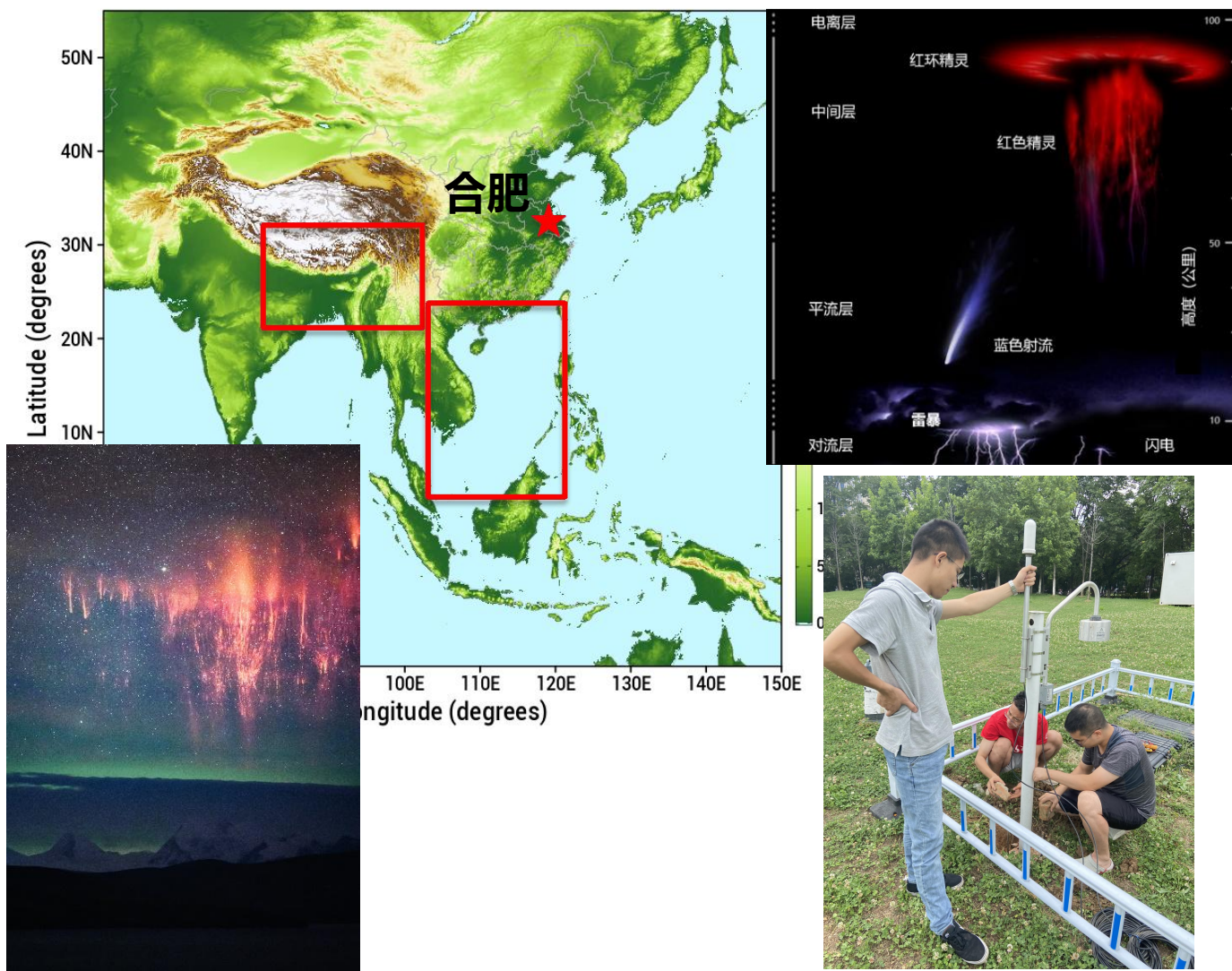


➤ 首次在中国沿海地区观测到负极性红色精灵 (6例) 和ELVES现象 (8例)，母体闪电峰值电流均超过100 kA (200 kA for elves)



➤ 海洋雷暴产生的强负地闪多由单次回击闪电产生

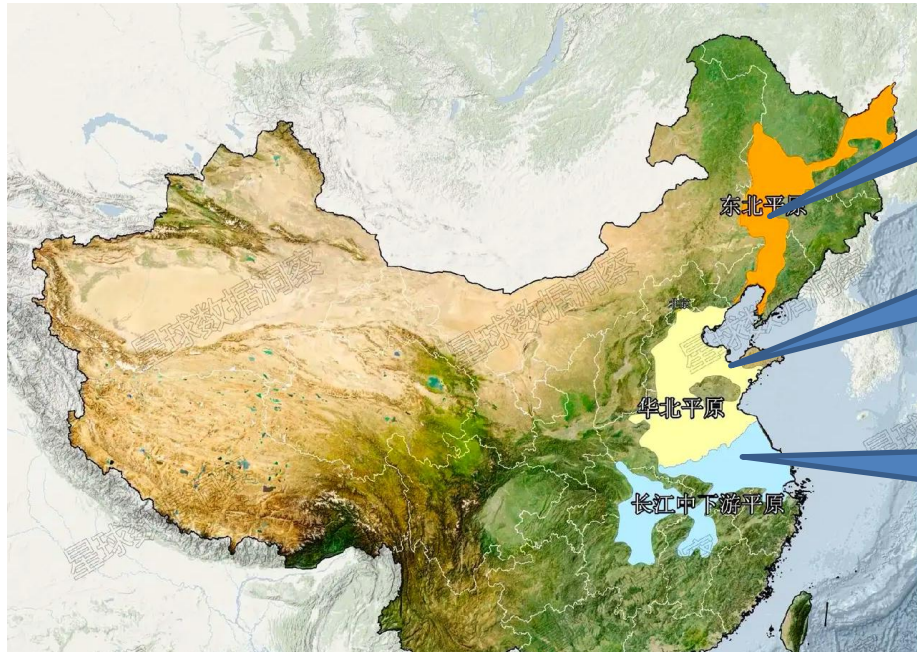
亚太地区雷暴临近空间电磁效应研究



- 中国大陆三级阶梯地形下的中高层放电现象母体雷暴特征;
- 海陆地区中高层放电现象母体雷暴特征的比较研究;
- 混合下垫面情形下的地球-电离层波导天电信号传播特征;
- 不同类型中高层放电现象对低电离层区域的影响研究;
- 人工智能方法在对流层雷暴-中高层大气电磁耦合研究中的应用。

2022年5月20日青藏高原南麓精灵群事件

Meteorological background of sprite observations in the plain area of China



Northeast Plain

350,0000 km²

North China Plain

310,0000 km²

Middle and Lower reach of
Yangtze River Plain

160,0000 km²

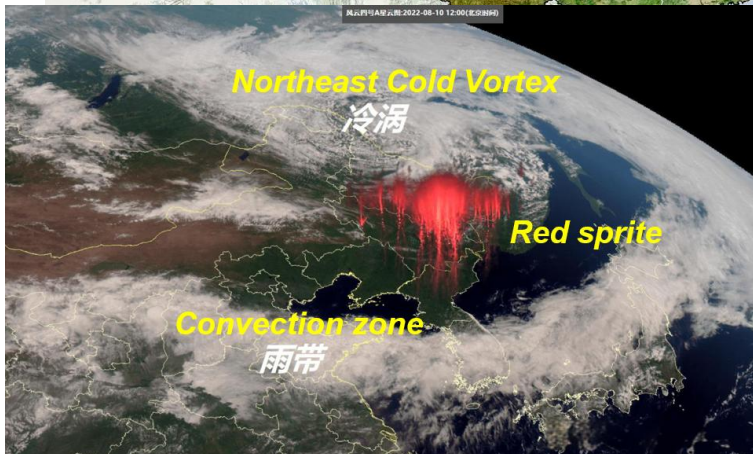
该地区目前尚未有科学
文献报道精灵观测

**Three major plains in
China, also known as
three major grain
producing areas in China**

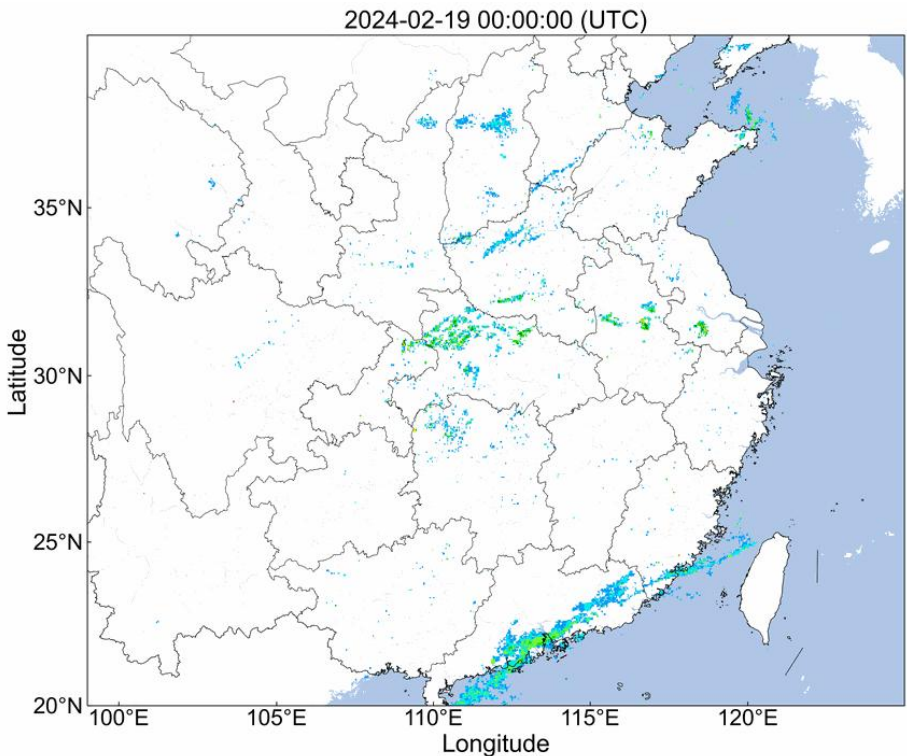
是否可服务于气候变化影响研究?

Data sources of sprite observations

- Space observations by ISUAL
- Ground-based observations reported in literature
- Contributions from amateurs/photographers



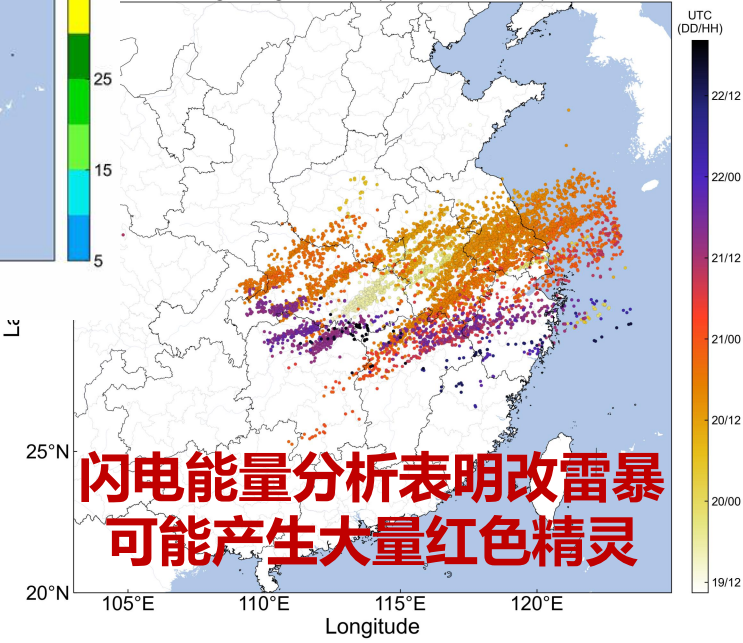
Characterizing lightning activity of a wintertime thunderstorm in the context of northeast China cold vortex



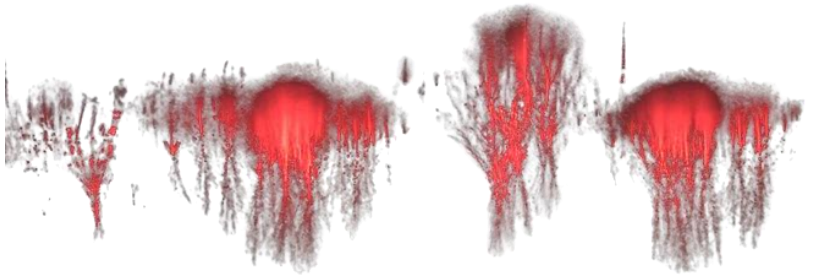
寒潮引发全国大范围“春雷”
江西过去24小时发生闪电7271次
今早你被惊醒了么？
光体看能：娟娟和胡燕燕
三人共发了 7272 次雷电
资料画面
正闪831次，负闪6440次
7272？吓死宝宝！
光体兄弟用心良苦
世人人人心险恶多端，不知反思！
光明就在眼前，世人却熟视无睹



Lightning >5000 J (19–22 Feb 2024)



闪电能量分析表明改雷暴
可能产生大量红色精灵



冬季雷暴&红色精灵



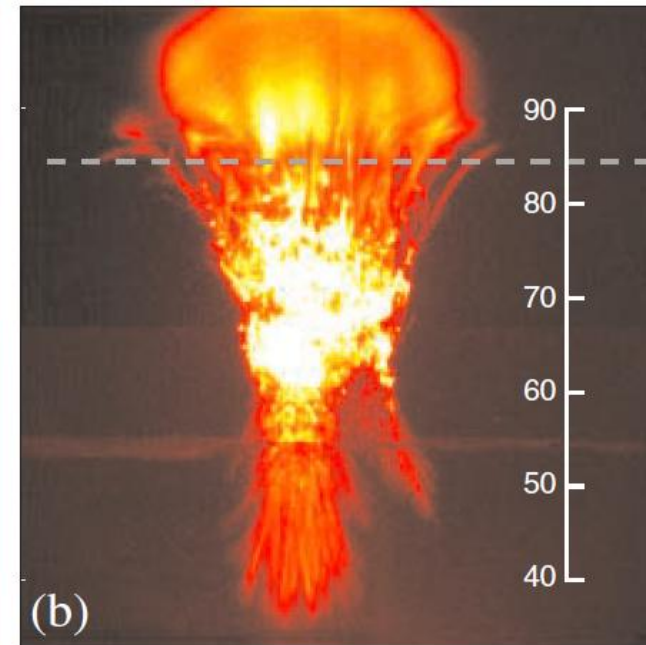
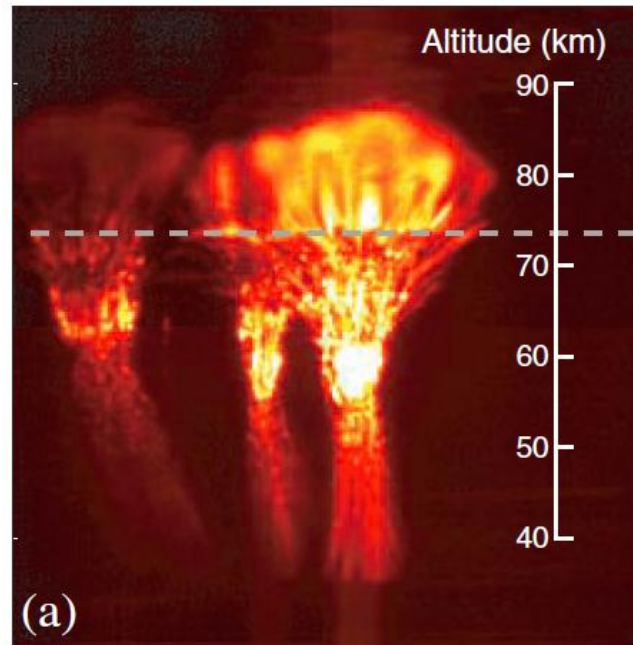
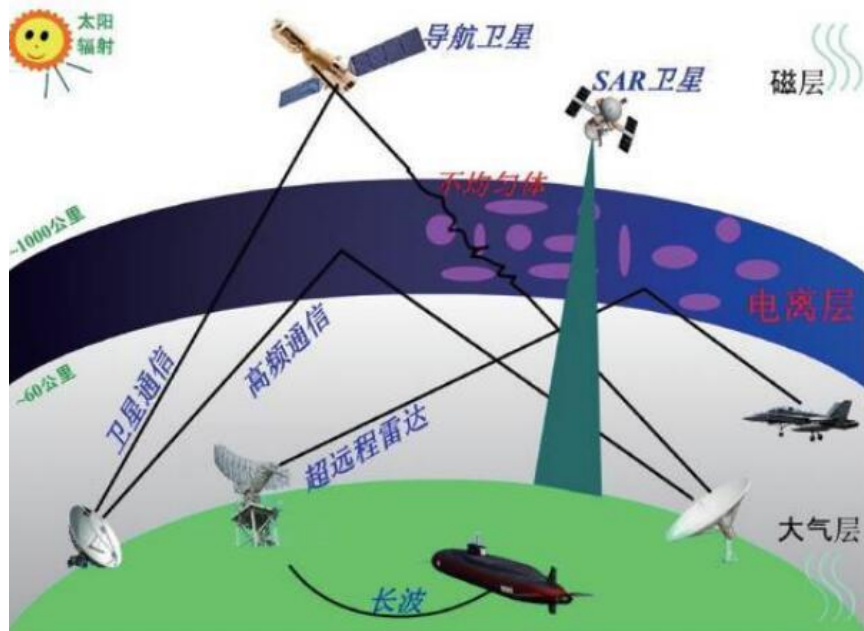
2024年冬季雷暴
形成背景：东北冷涡+西风带
扰动带来的西暖湿气流

红色精灵和中国的名山大川



图片由胡志远提供

中高层放电事件是否会导致电离层不规则体？



Stenbaek and Pakso (2002)

- 中高层放电现象引起的电离层底部扰动是否有可能成为电离层不规则体形成的种子？
- 中高层放电现象引起的电离层D区电子浓度增加能够持续多久？会导致哪些可观测效应？



图片由王晋提供

8/4/2025

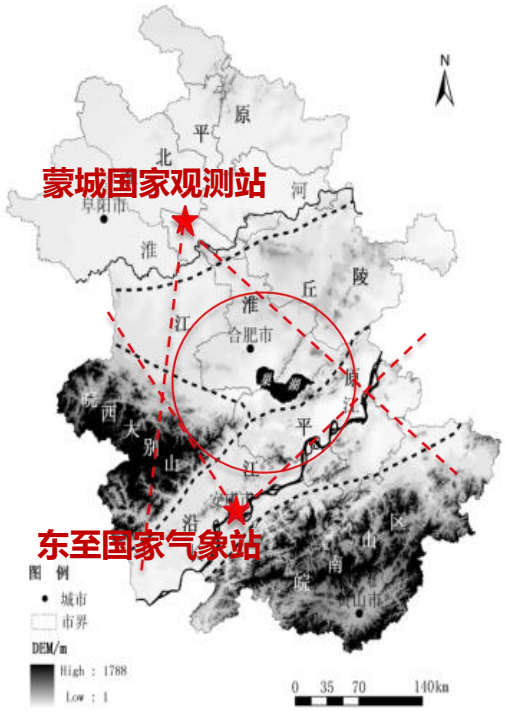
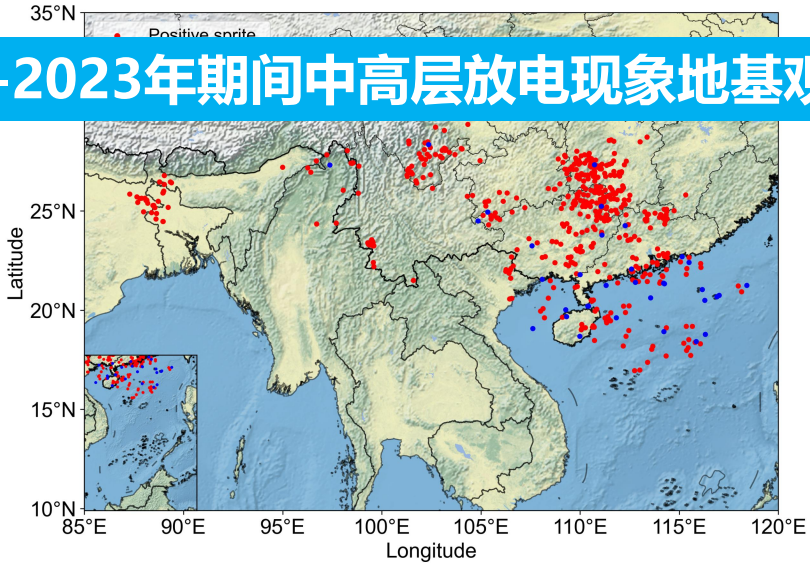
支撑性研究平台建设

2020-2023年期间中高层放电现象地基观测



- 中国科大混合基线雷电定位网
- 风云系列卫星综合观测数据
- 广域地基雷达反射率合成图
- 雷电脉冲电荷矩实时侦测系统

- 多源数据融合+机器学习方法
- 服务于中高层放电现象观测群体，推进协同观测
- 保障对流层雷暴同中高层大气耦合过程的基础研究



Sprite observations in plain area of China



Northeast Plain

350,0000 km²

North China Plain

310,0000 km²

Middle and Lower reach of
Yangtze River Plain

160,0000 km²

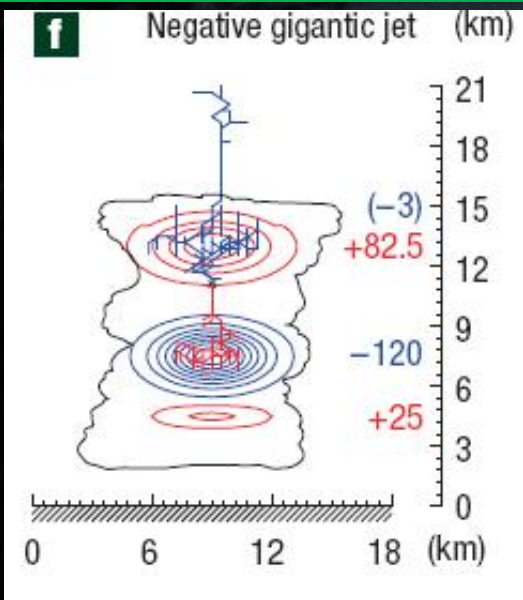
**Three major plains in
China, also known as
three major grain
producing areas in China**

Data sources of sprite observations

- Space observations by ISUAL
- Ground-based observations reported in literature
- Contributions from amateurs/photographers

巨大喷流-源自雷暴的电喷泉

“巨大喷流”的电荷不平衡理论

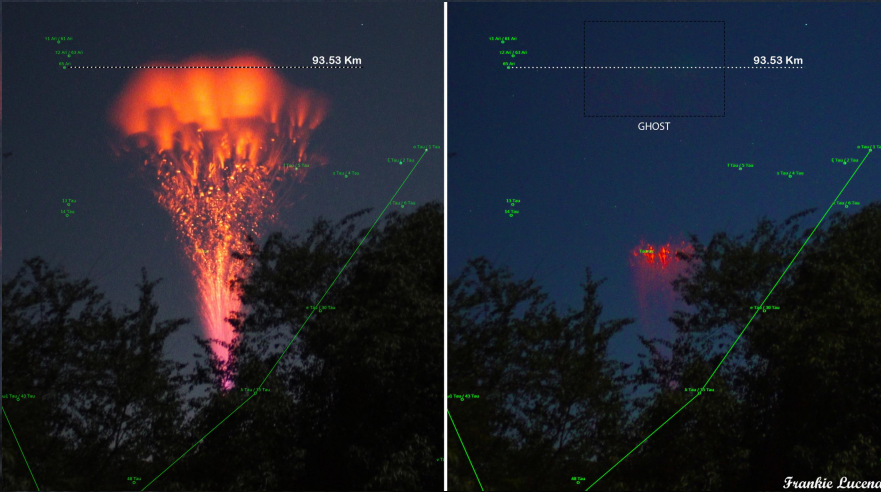


Krehbiel et al. [2008]-Nature Geoscience

8/4/2025

巨大喷流
Gigantic jet

背景星场对比确定高度

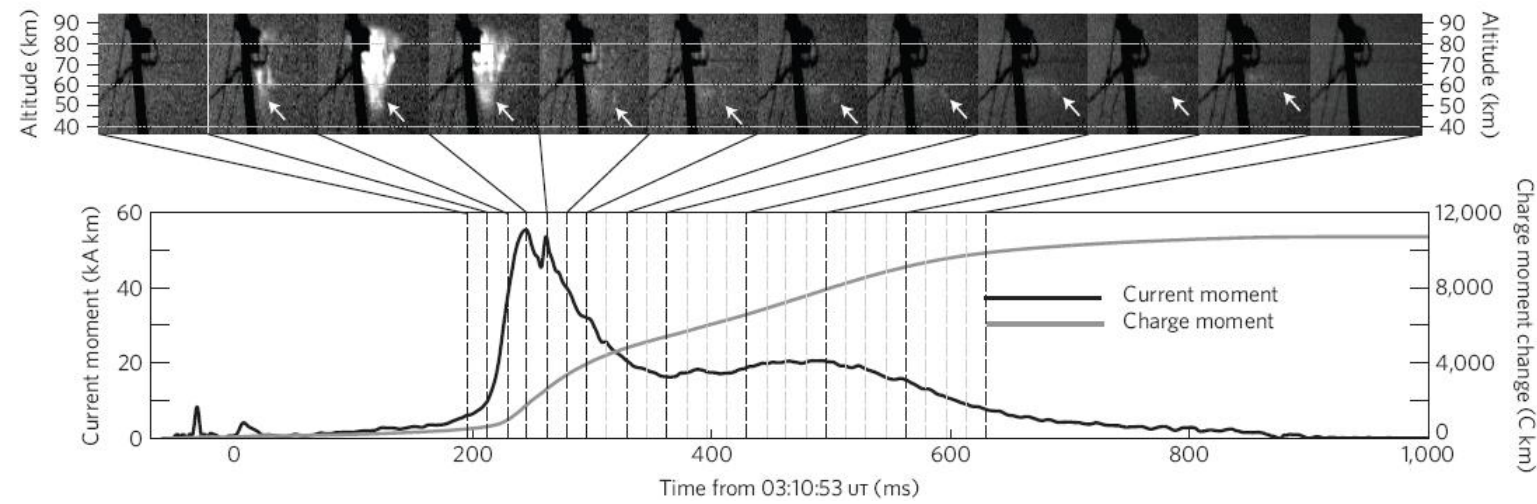


ShutterWizard
Frankie Lucena

20/09/21 02:41:40 0609.0

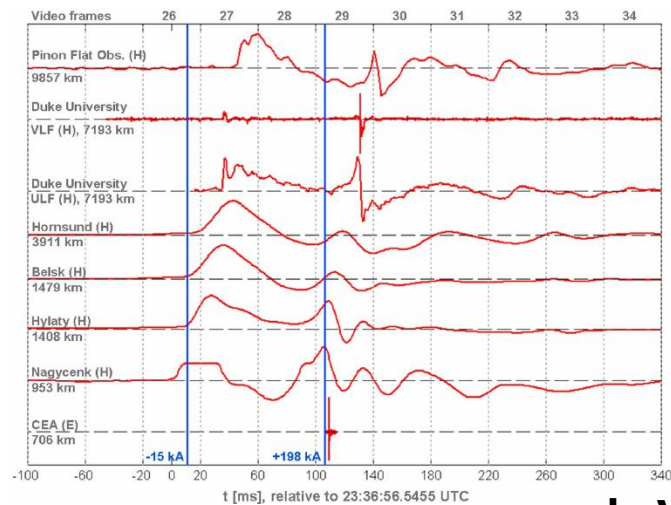
Frankie Lucena⁴⁸

巨大喷流的宽频磁场信号



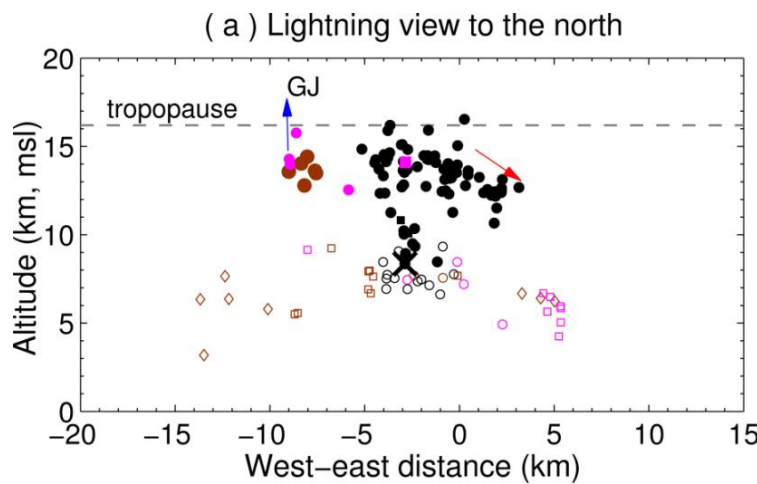
负极性巨大喷流 (向上传输负电荷)

Cummer et al. (2017)



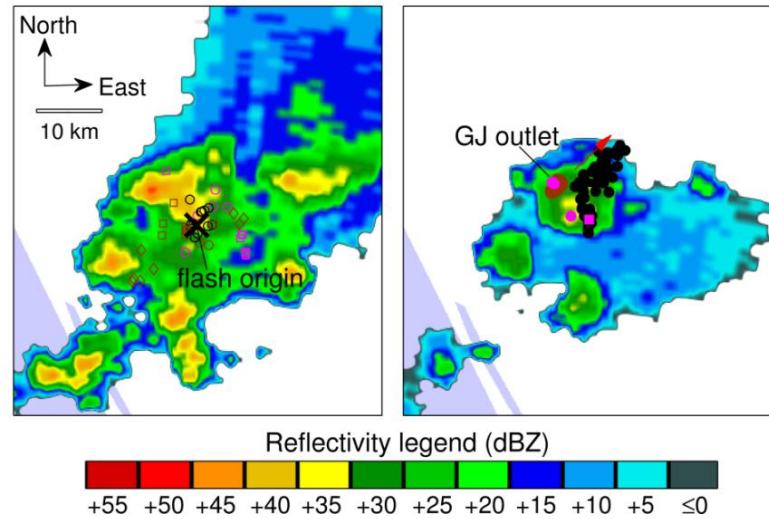
正极性巨大喷流 (向上传输正电荷)

van de Velde et al. (2010)



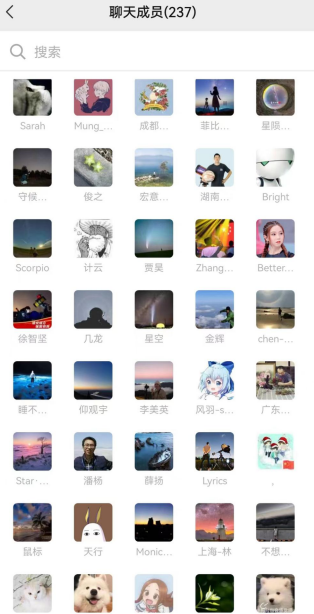
(b) KMLB scan at 2.41°

(c) KMLB scan at 5.31°

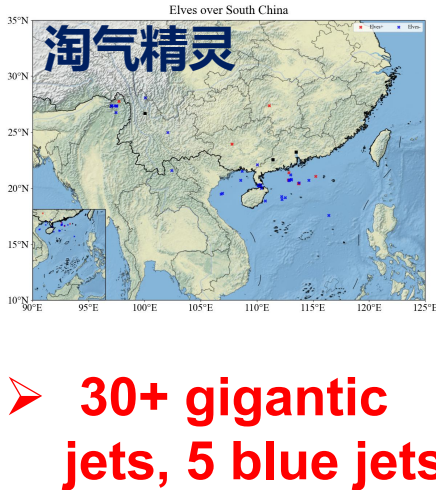
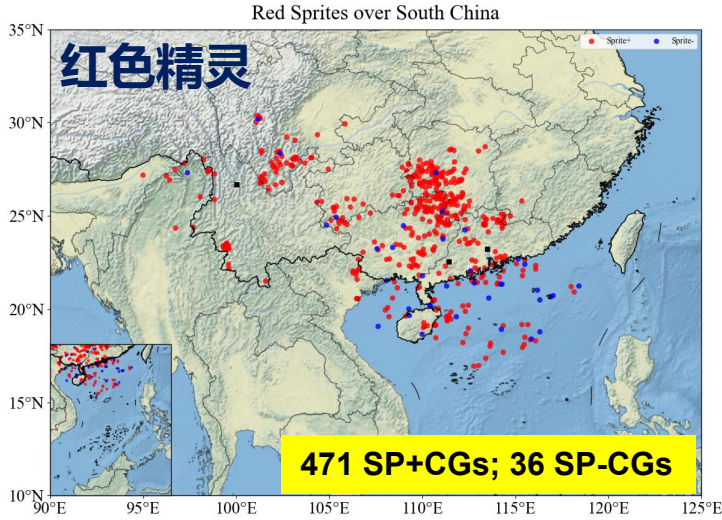
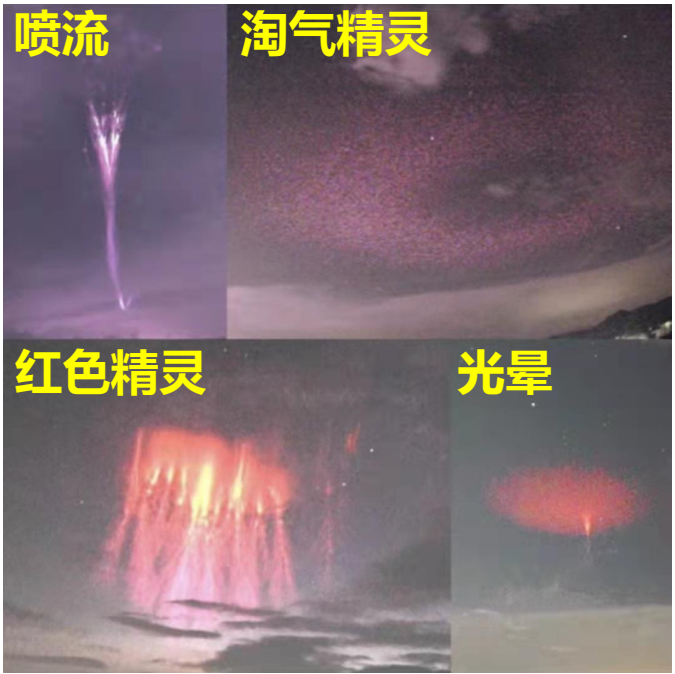
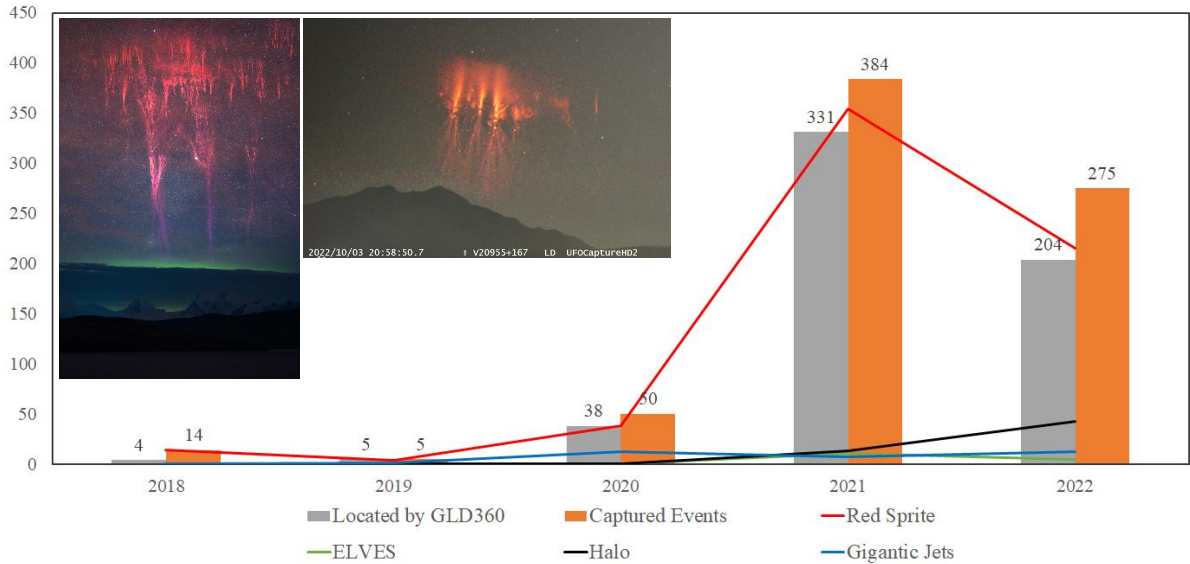


Lu et al. (2011), 爱好者数据

2018-2022年期间华南TLE观测

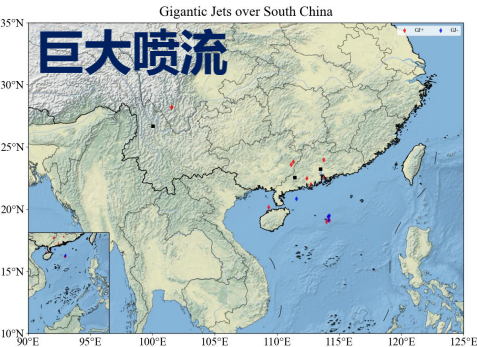


Interannual Variation of TLEs over South China

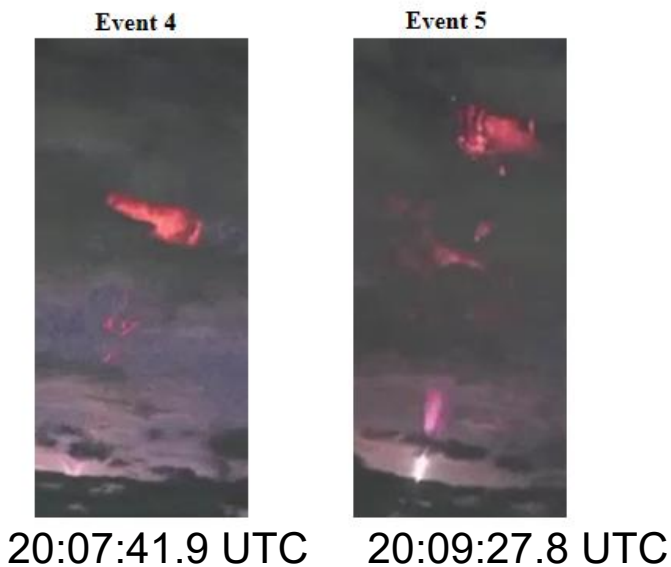
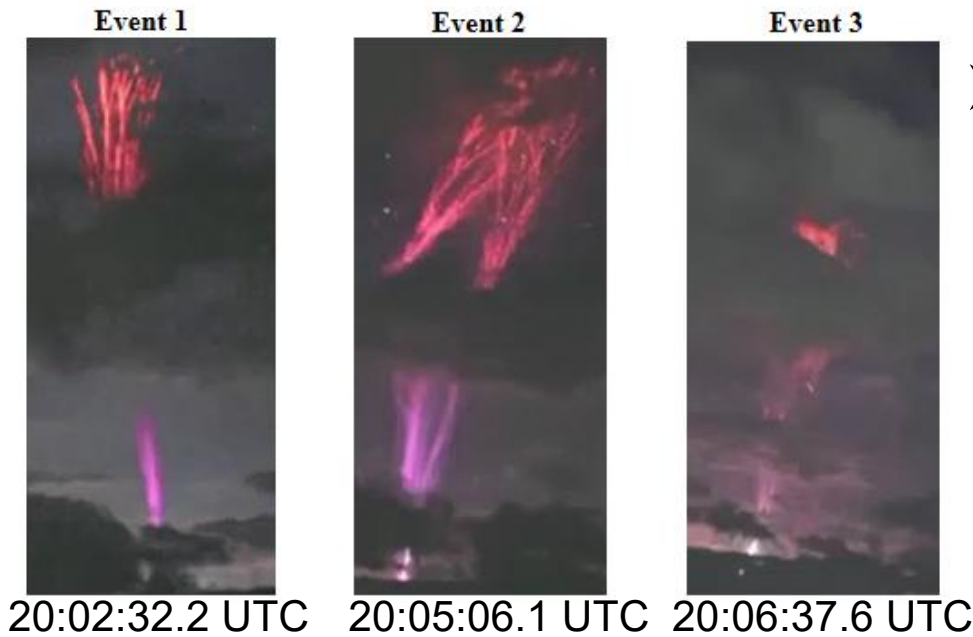


➤ 10+ elves

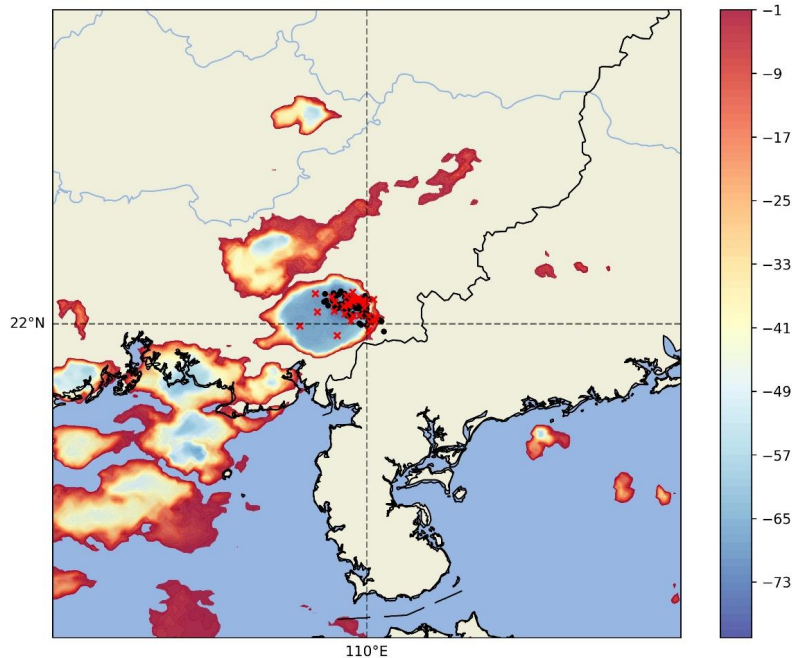
➤ 30+ gigantic jets, 5 blue jets



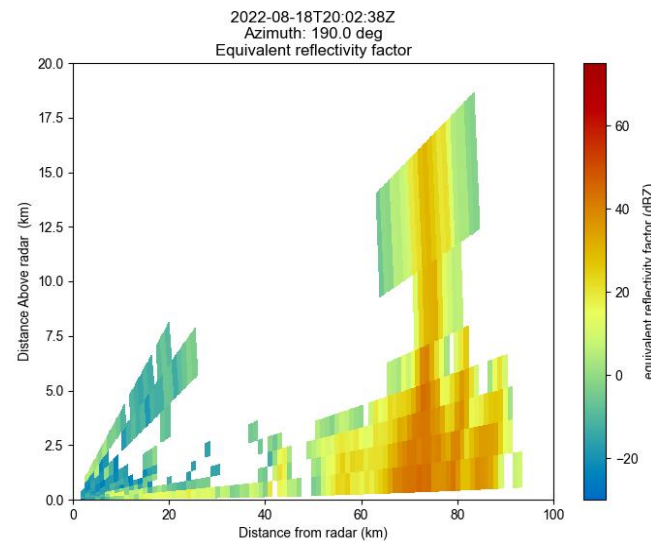
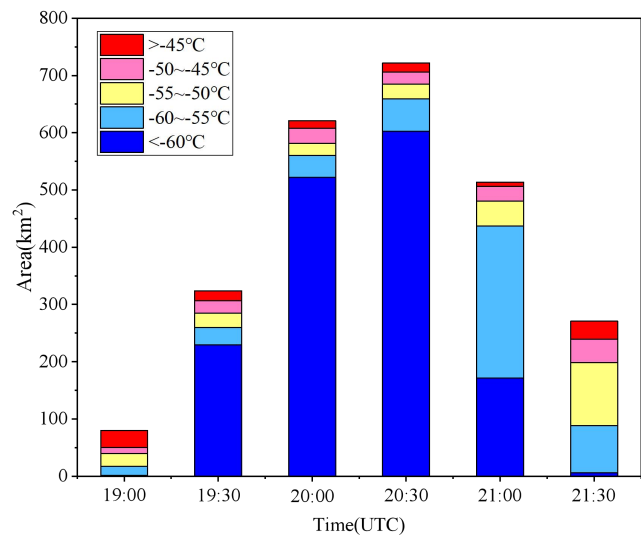
雷暴个例：南海一次热带低压产生的多个巨大喷流



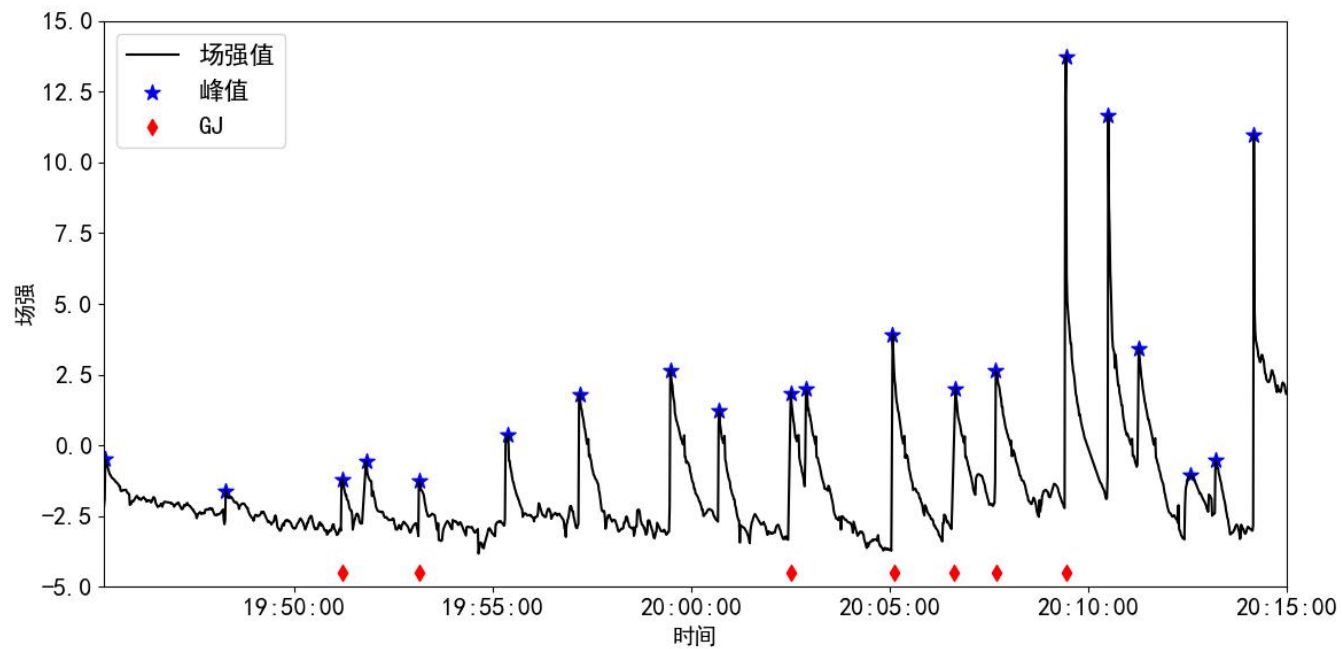
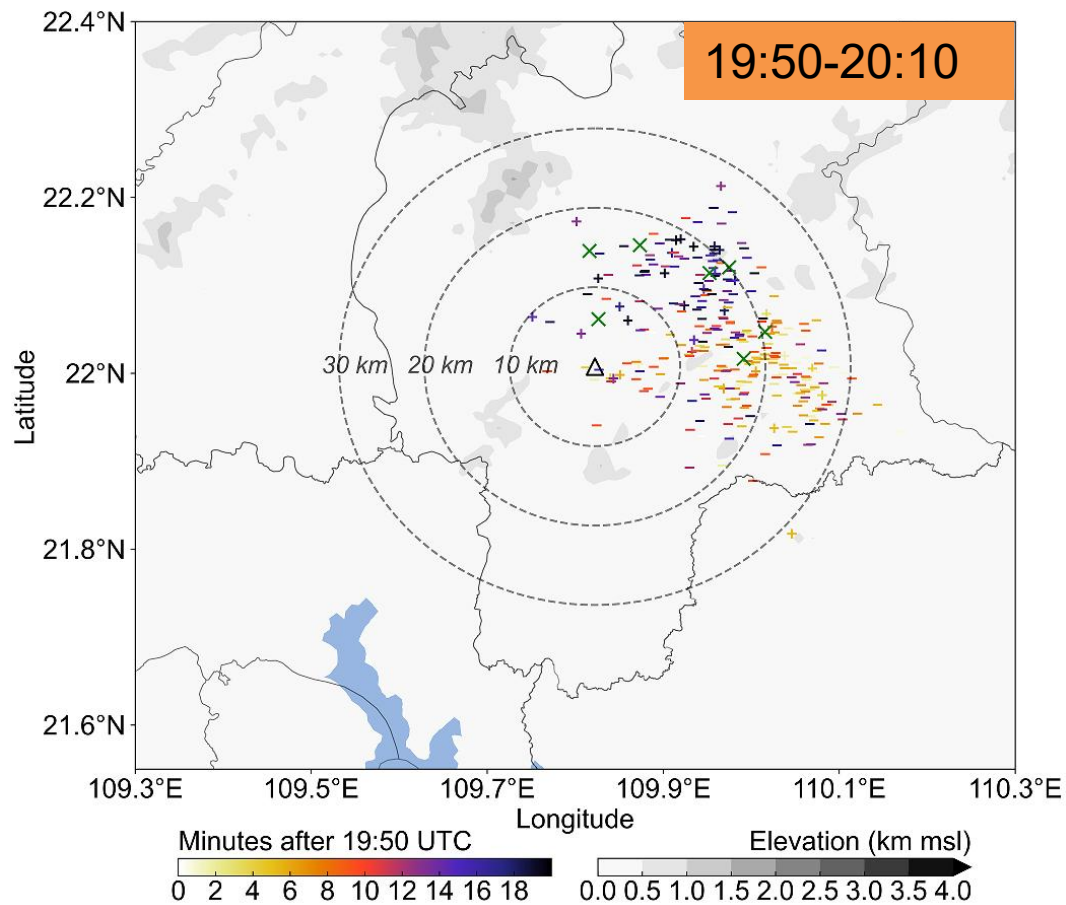
➤ 2022年8月19日凌晨 (四点左右) 观测到多个巨大喷流事件



发生位置：广西沿海

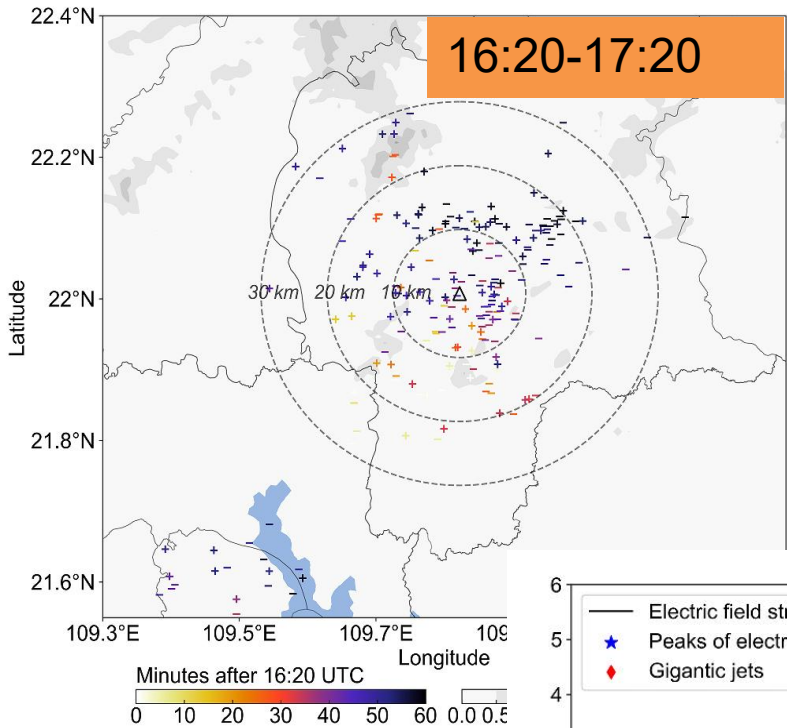


新发现-巨大喷流引起的地表电场变化

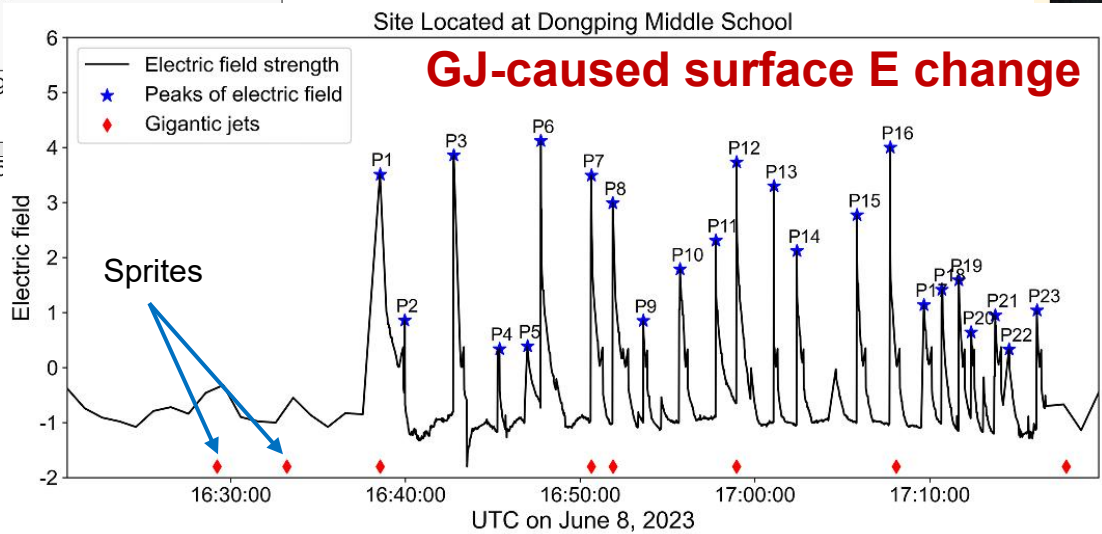


爱好者数据+合作企业数据

2023年6月9日个例再现类似结果



■ 地面电场变化测量组网
测量可进行喷流现象电
荷传输结构反演



GJs captured on June 9, 2023

In August of 2023, two gigantic jets were recorded near coast of Guangdong Province



Credit to Mr. Keqiang Li

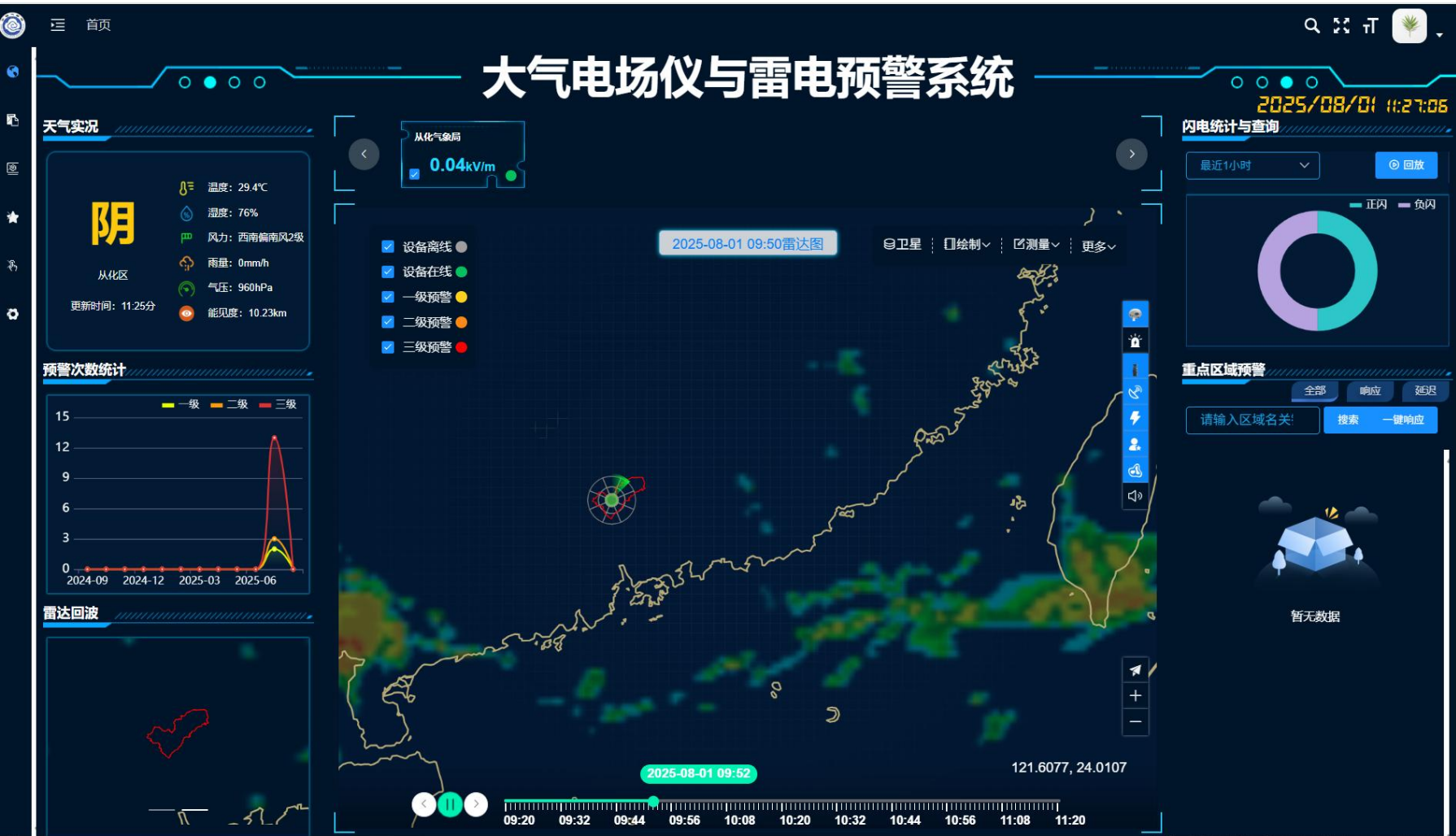


In June of 2024, a sequence of gigantic jets were captured over South Asia



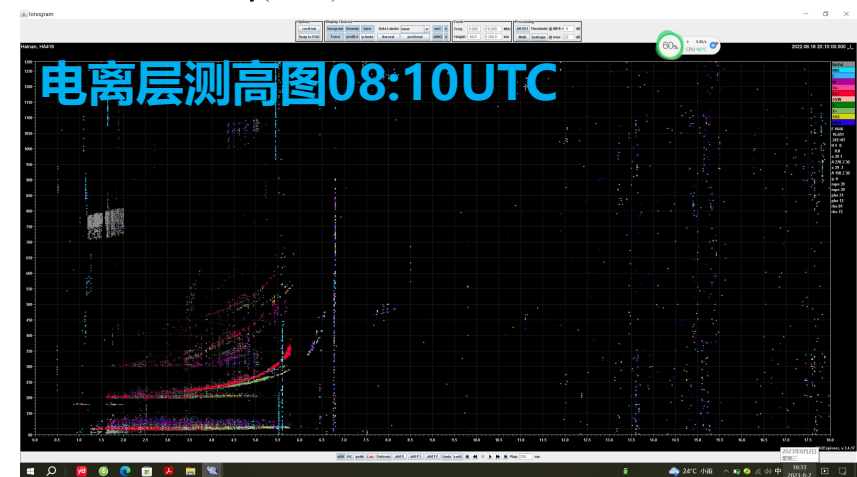
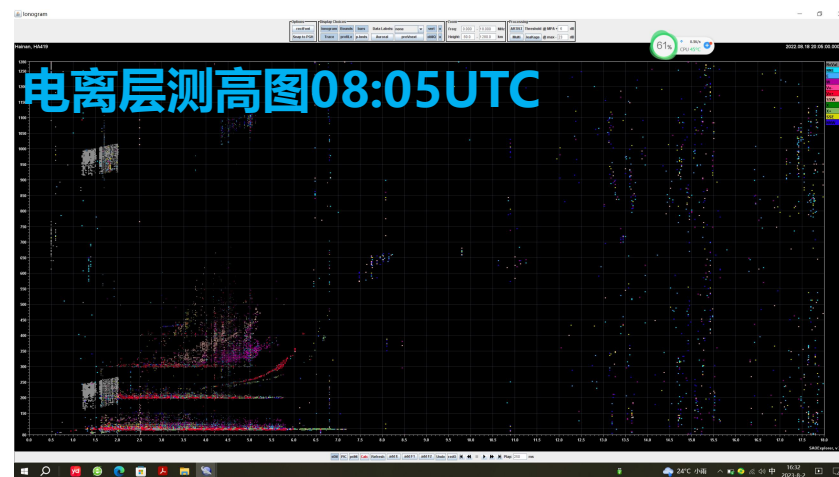
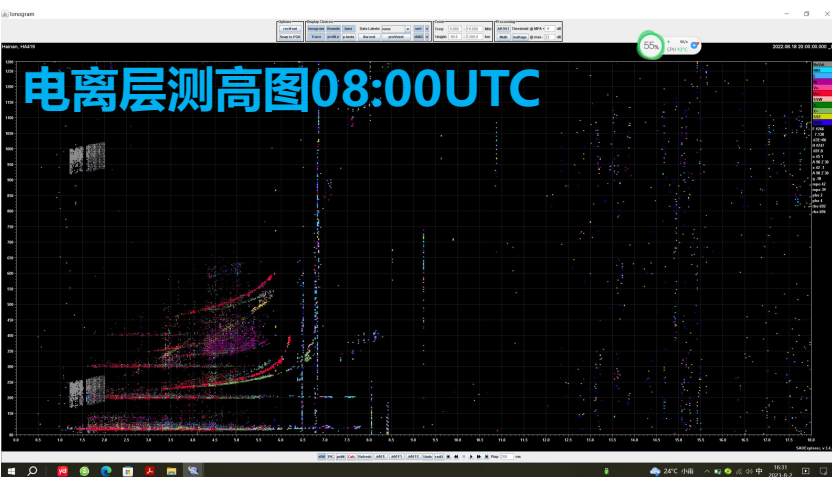
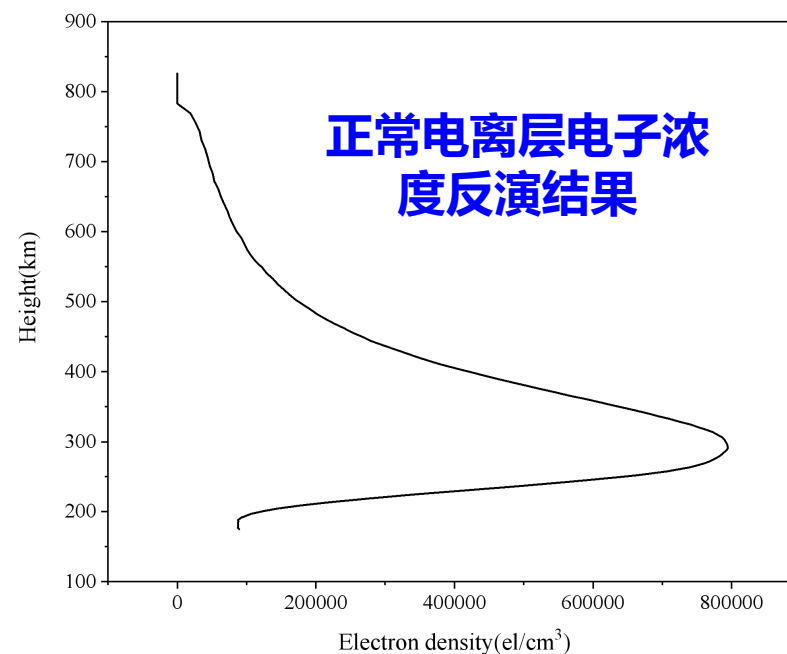
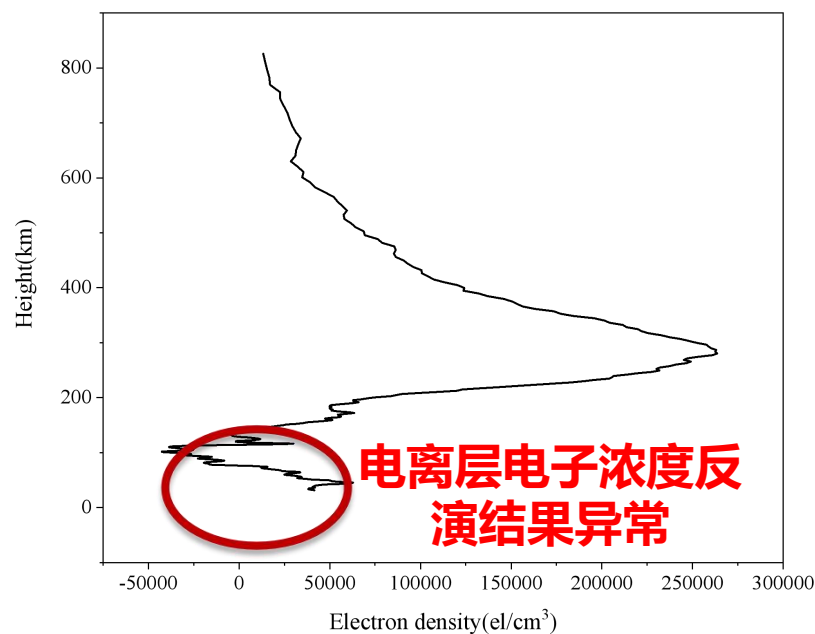
Credit to Mr. Xuanhua Li

助力气象行业提高雷暴预警产品准确性



巨大喷流可能引起的低层大气电子浓度扰动？

■ 2022年8月18日喷流事件分析结果

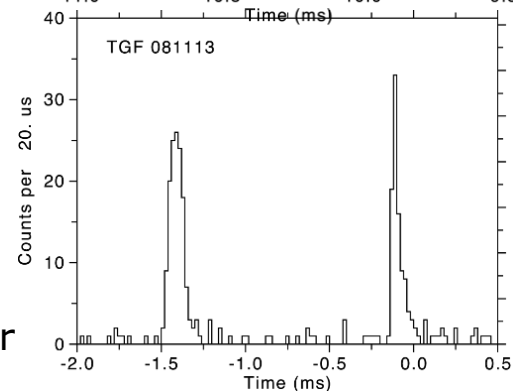
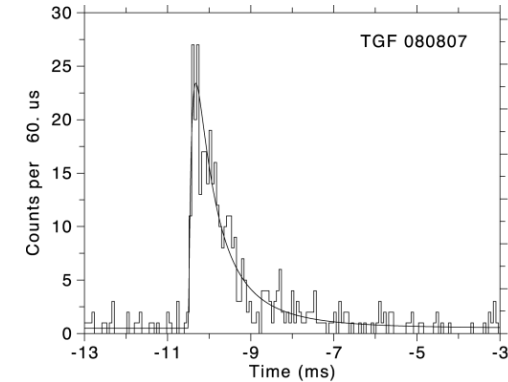
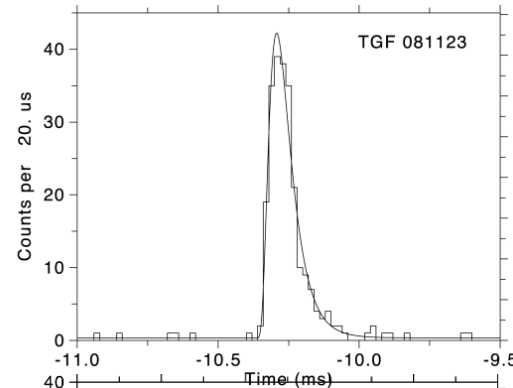
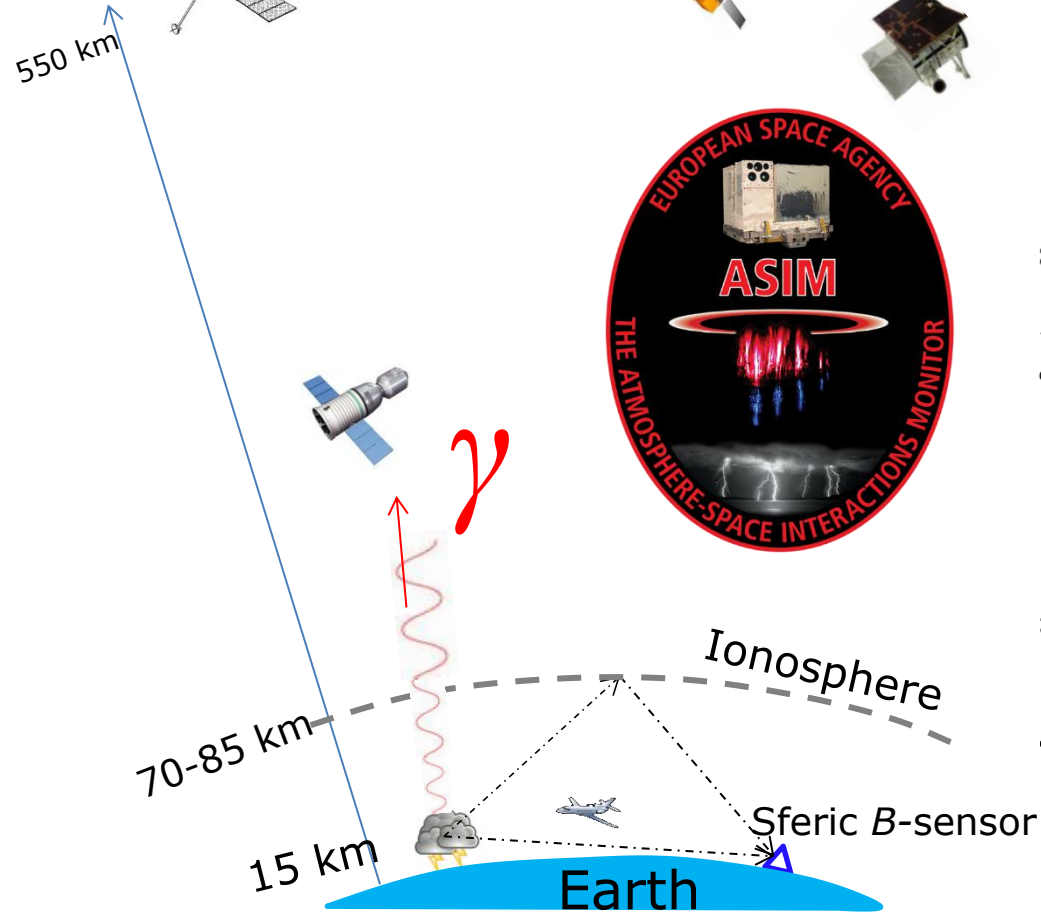


地球伽玛射线闪 (Terrestrial Gamma-ray Flashes)

CGRO/BATSE (Fishman et al. [1994])
RHESSI (Smith et al. [2005])
Fermi/GBM (Briggs et al. [2010])
AGILE (Marisaldi et al. [2010])

Insight-HXMT
(Zhang et al. [2020])

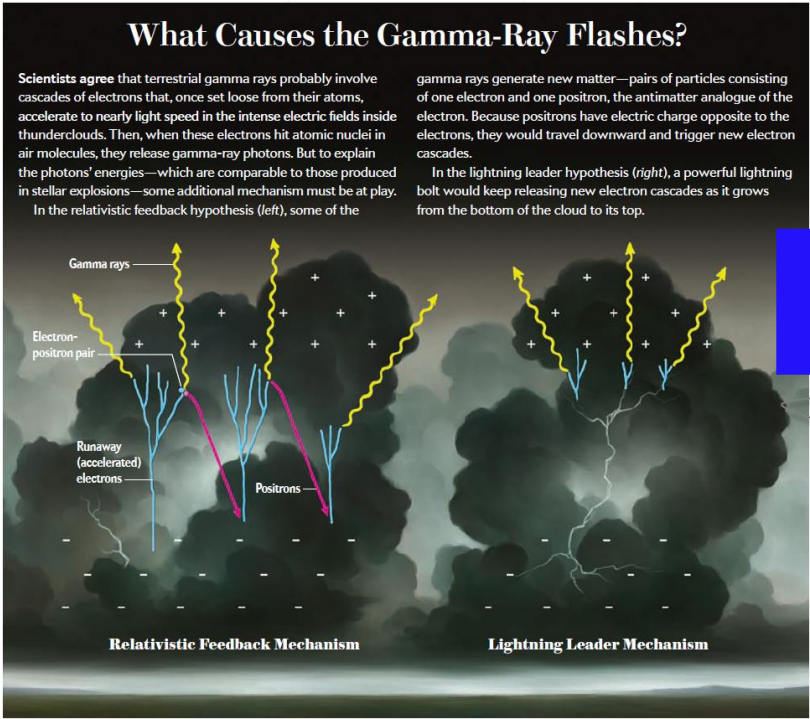
GECAM
(launched in December of 2020)



Briggs et al. [2010]
Fishman et al. [2011]

- 持续时间: 0.1 ms to a few ms
- 单脉冲或者多脉冲
- 引起航天器静电积累导致放电

雷暴和闪电的高能辐射效应



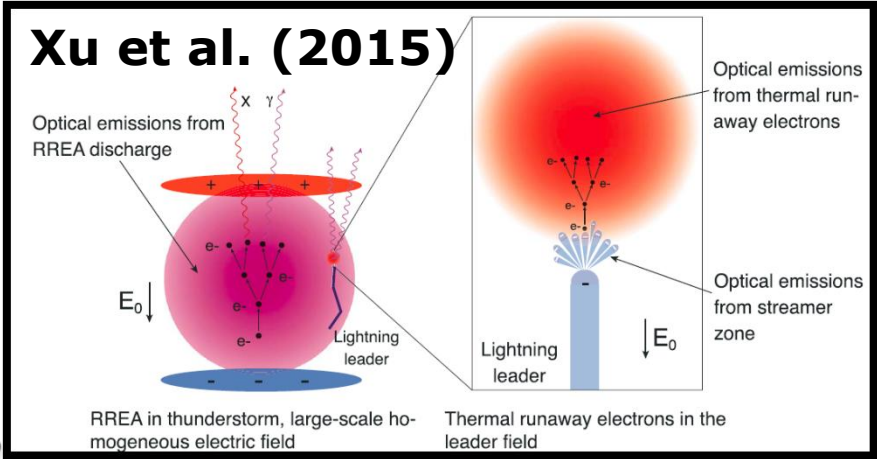
雷暴云中的
粒子加速器

雷暴云

初始放电

地面

Lu et al. (2010)



I-相对论反馈机制 II-闪电先导机制

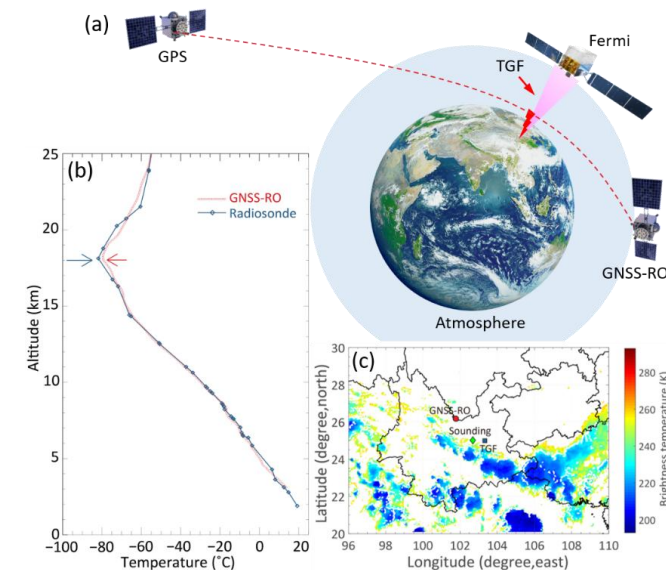
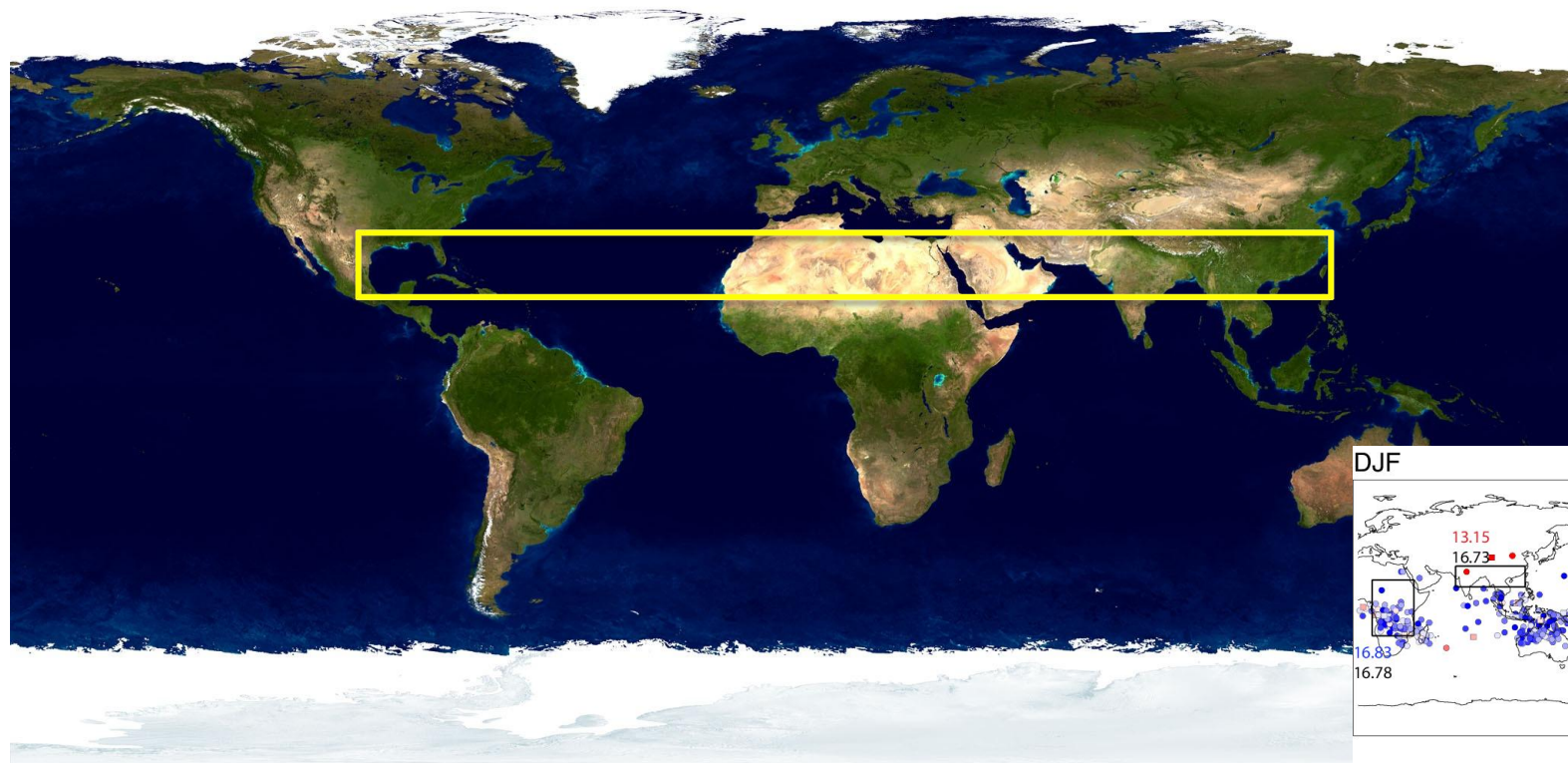
$I(t)$

闪电始发

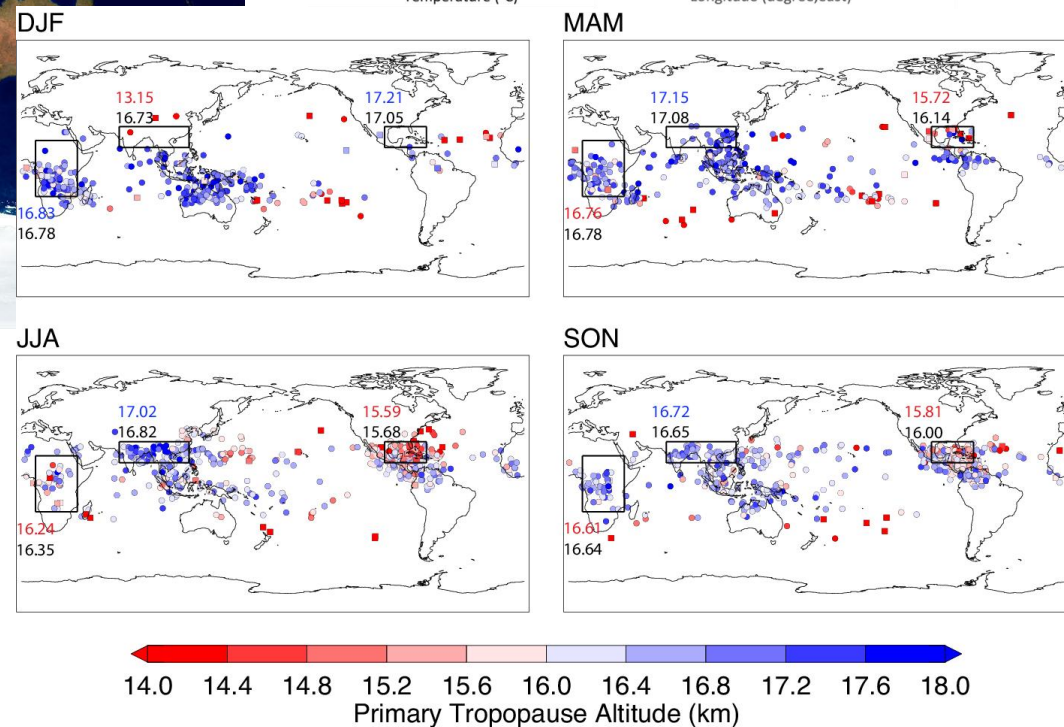
云内脉冲

2 ms

TGF观测区对流层顶高度统计特征



- GNSS掩星技术用于反演TGF雷暴区域的对流层顶高度
- 南亚/华南地区的TGF雷暴对流层顶高度比加勒比海地区平均高1.4公里



Xian, Lu et al. (2021)

雷电研究

---带你上天入海

