



实验室长空气间隙正极性先导放电行为 研究进展

黄胜鑫 副教授

合肥工业大学电气与自动化工程学院

2023年10月17日



01 研究背景

02 研究方法

03 研究进展

04 研究展望

01 研究背景



- 雷电本质上是一种发生在雷云之间或雷云与大地之间的超长空气间隙放电；
- 掌握雷电先导放电特性与机制是雷电防护的基础与关键；
- 90%的地闪为负极性，从地面目标物起始、决定雷击点的迎面先导放电为正极性。



□ 输电线路雷击过程

电气几何模型（滚球法）

对正极性先
导放电行为
认识的深入

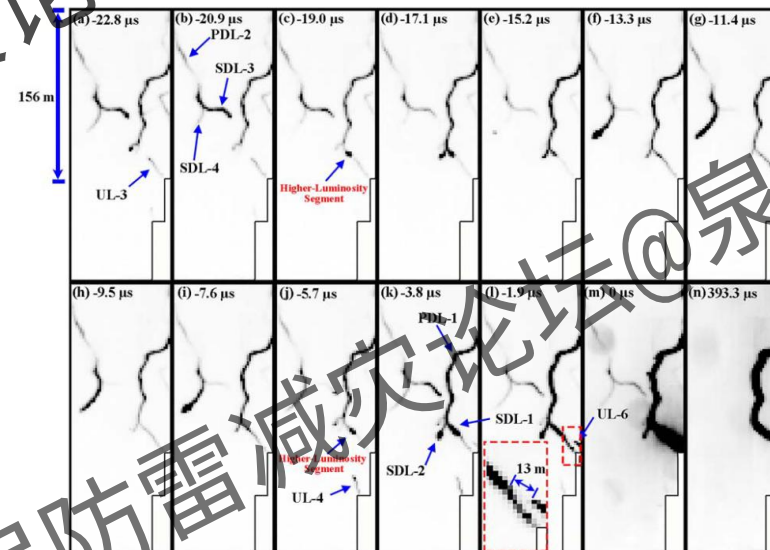
先导发展模型（SLIM、
LPM等）

□ 掌握正极性先导放电行为是地闪防护的基础

01 研究背景



- 近年来，基于雷电观测，对正极性先导放电行为的认识逐渐深入；
- 但由于自然雷电发生具有偶然性、正极性先导VHF辐射特征与机制尚未完全明确等原因，完全通过雷电观测揭示正极性先导放电机制难度较大。



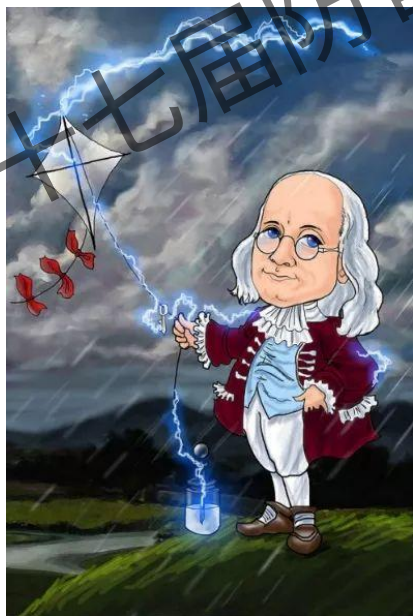
▣ 郅秀书教授团队对人工触发雷电正极性迎面先导发展行为观测结果 (Jiang et al., 2013)

▣ 吕伟涛教授团队对自然雷电接闪过程中正极性迎面发展行为观测结果 (Qi et al., 2019)

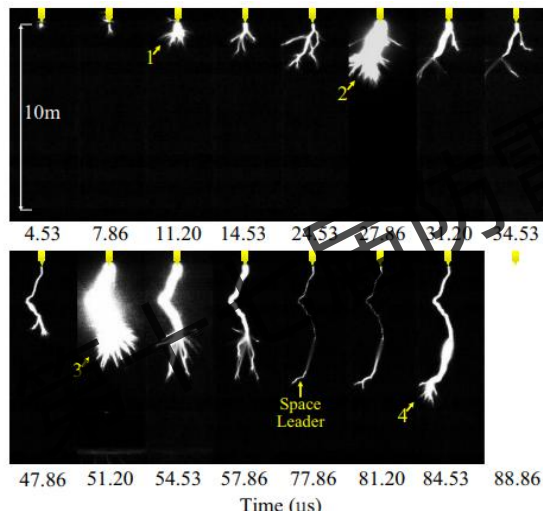
01 研究背景



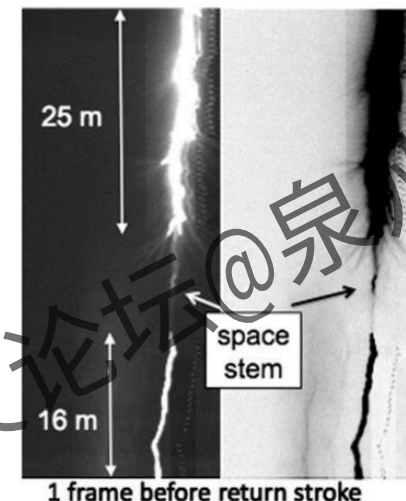
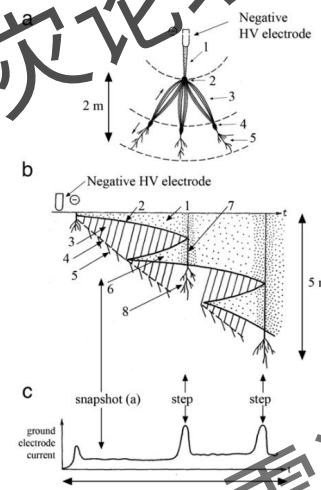
- 自然雷电与实验室长空气间隙放电有着相似（similar or common）的物理本质；
- 实验室长空气间隙放电可以为认识雷电先导放电提供帮助：负极性先导梯级放电过程中，空间先导（space leader）首先在实验室长空气间隙放电实验中发现，后在雷电观测中证实。



- ❑ 富兰克林风筝实验证明雷电的“电”本质



- ❑ 实验室长空气间隙负极性先导放电过程



- ❑ 负极性雷电先导放电过程中 space stem (Baigi et al., 2009)

✓ 通过实验室长空气间隙放电研究深化对正极性先导放电行为的认识



01 研究背景

02 研究方法

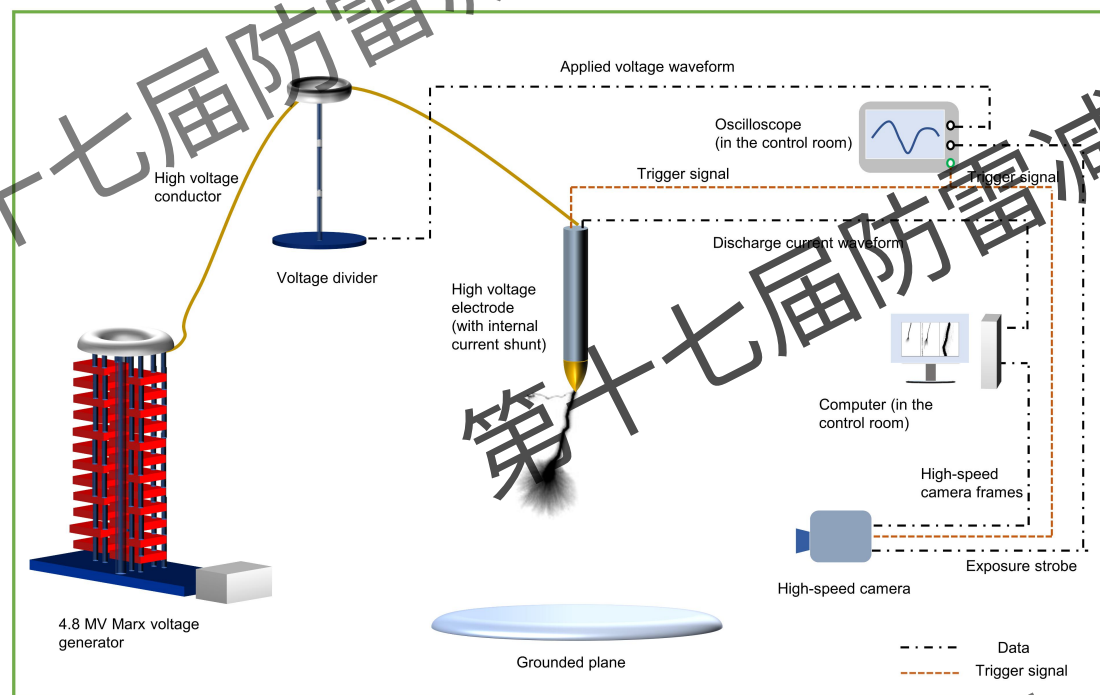
03 研究进展

04 研究展望

02 研究方法



- 基本原理：利用Marx冲击电压发生器产生正极性冲击电压施加于长空气间隙产生正极性先导放电；
- 优势：放电（条件）可控、观测便利。



外施电压波形选择：

标准雷电冲击 ($1.2/50\mu\text{s}$)：用于模拟回击后形成于电力设备的雷电过电压 $\times$

标准操作冲击 ($250/2050\mu\text{s}$)：可控制电压上升率接近接闪过程中地面目标物顶端感应电位变化率 $\checkmark$

■ 观测量：外施电压、高电位电流、光学形态、纹影图像等。

□ 长空气间隙正极性先导放电研究实验平台



01 研究背景

02 研究方法

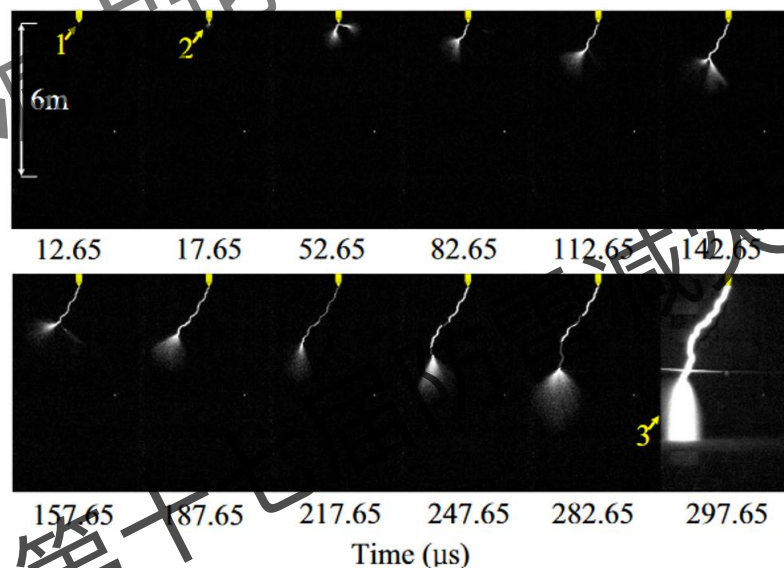
03 研究进展

04 研究展望

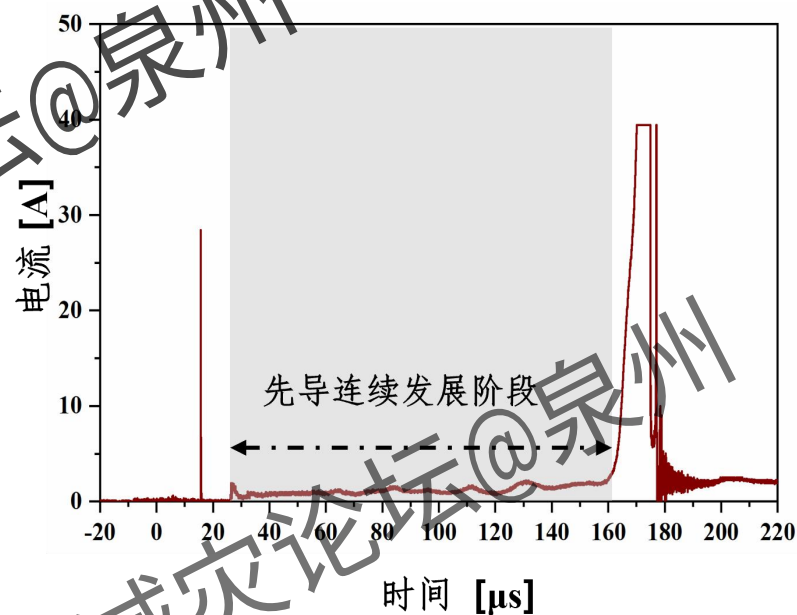
03 研究进展



- 早在上世纪70年代即发现，实验室尺度下正极性先导主要以稳定的（准）连续模式发展。



□ 正极性先导连续发展过程光学观测



□ 正极性先导连续发展电流测量结果

正极性先导稳定连续发展特征：速度基本保持不变，通道亮度无显著变化，放电电流无明显脉冲。

03 研究进展



- 同时期还发现，正极性先导发展过程中可能会出现两类不符合稳定连续发展特征的发展行为，即 Restrike（“重燃”）。

✓ 第1类Restrike

背景电场上升率较低时

环境湿度较高时

✓ 第2类Restrike



□ 第1类Restrike过程旋转相机观测结果（Renardières, 1977）



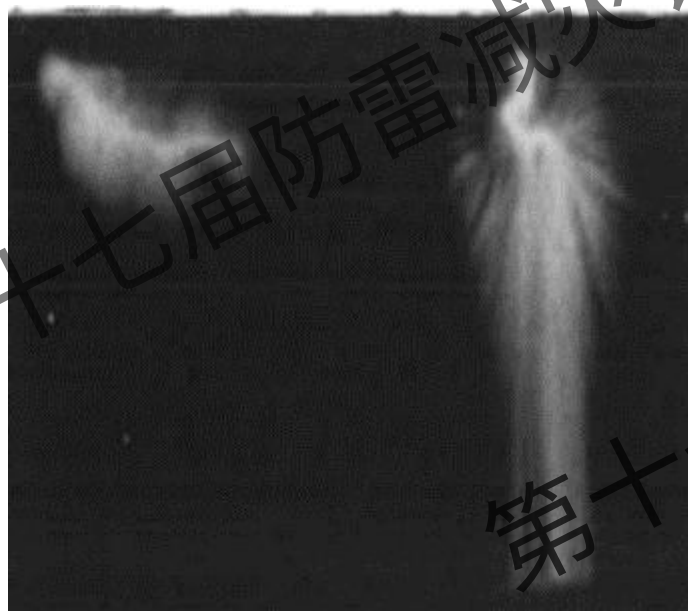
□ 第2类Restrike过程旋转相机观测结果（Renardières, 1977）

03 研究进展

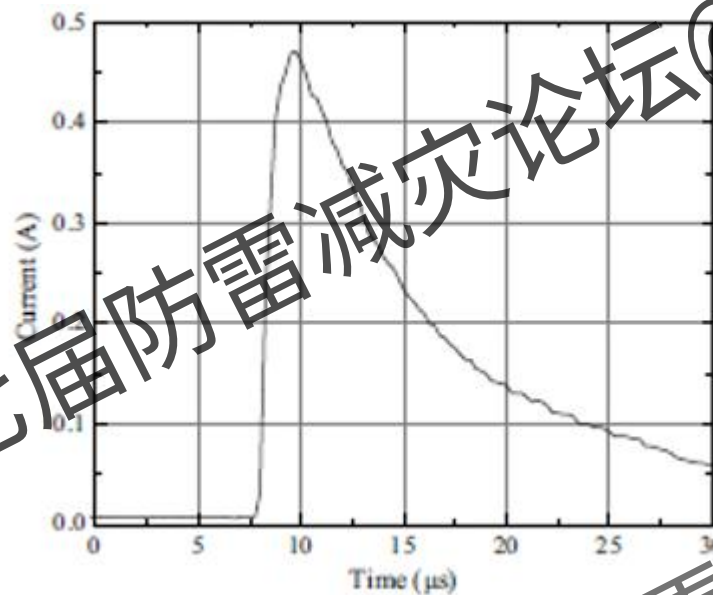


合肥工业大学
HEFEI UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

- ▶ 第1类Restrike发生前，出现先导放电停止、电流关断（cut off）、先导通道与电极脱离等现象。



□ 第1类Restrike过程旋转相机观测结果
(Renardières, 1977)



□ 第1类Restrike过程电流测量结果 (Yue et al., 2015)

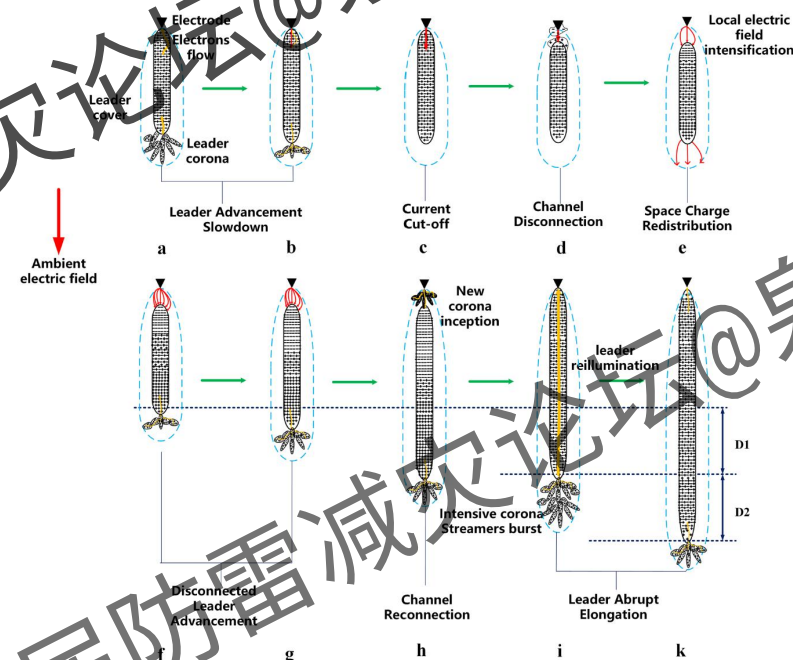
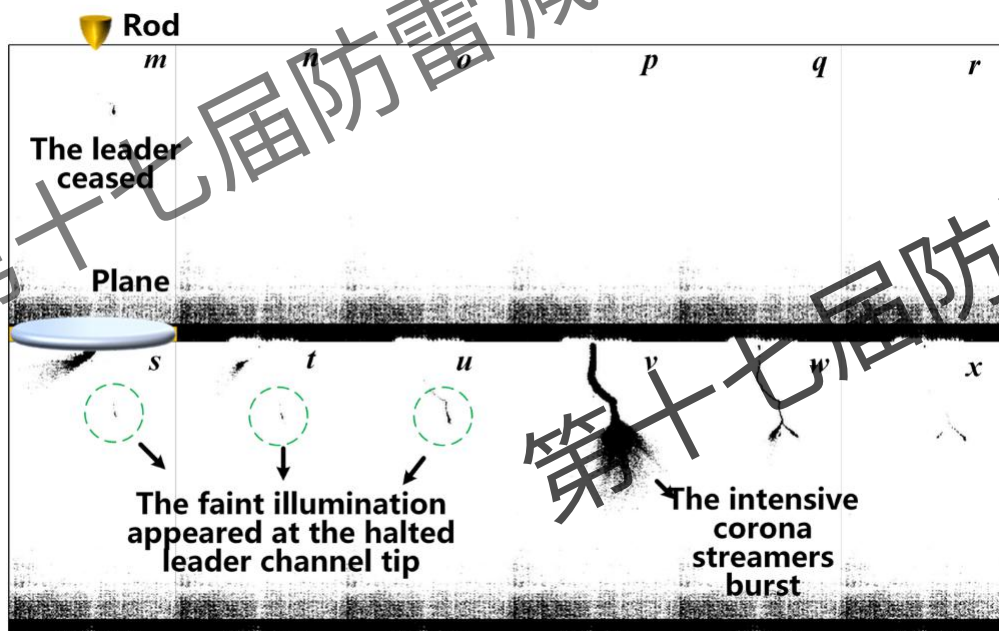


□ 先导“熄灭”后，先导通道与电极脱离

03 研究进展



- 近年来，观测到第1类Restrike发生前，“熄灭”的先导头部“重激活”现象；
- 据此推测：第1类Restrike与“熄灭”后“孤立”的先导通道静电弛豫有关。



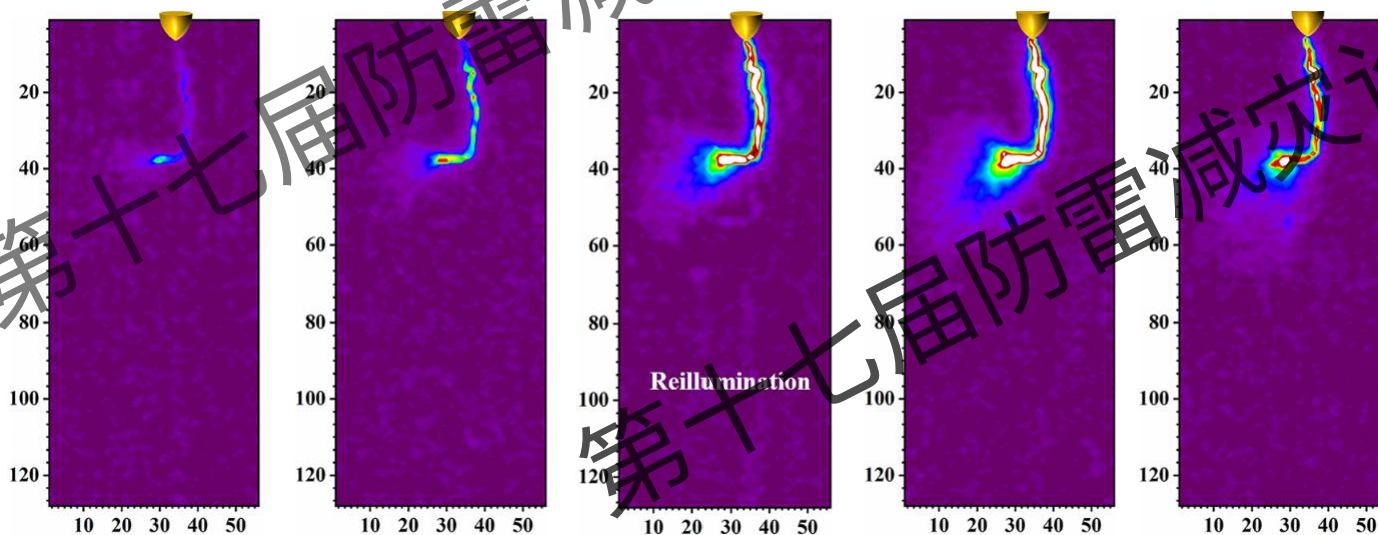
□ 第1类Restrike前先导通道头部“重激活”现象
(Huang et al.,2019)

□ 第1类Restrike机制推测

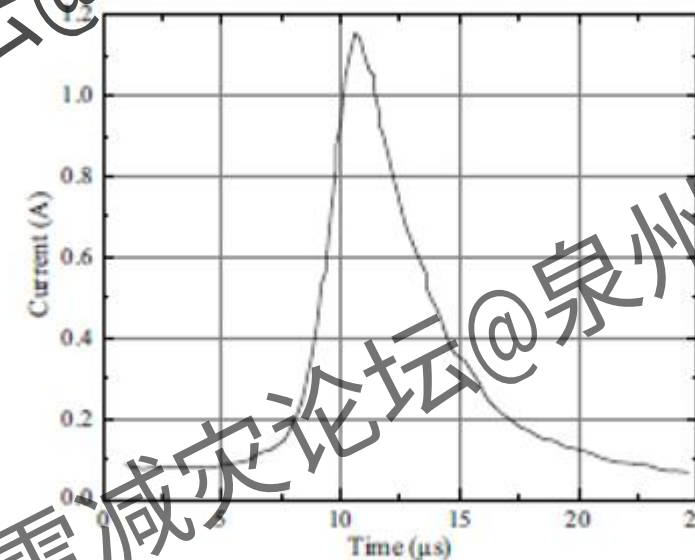
03 研究进展



- 第2类Restrike发生于先导稳定连续发展过程中，不伴随先导通道突增和电流关断。



第2类Restrike过程高速摄像机观测结果
(Huang et al., 2022)

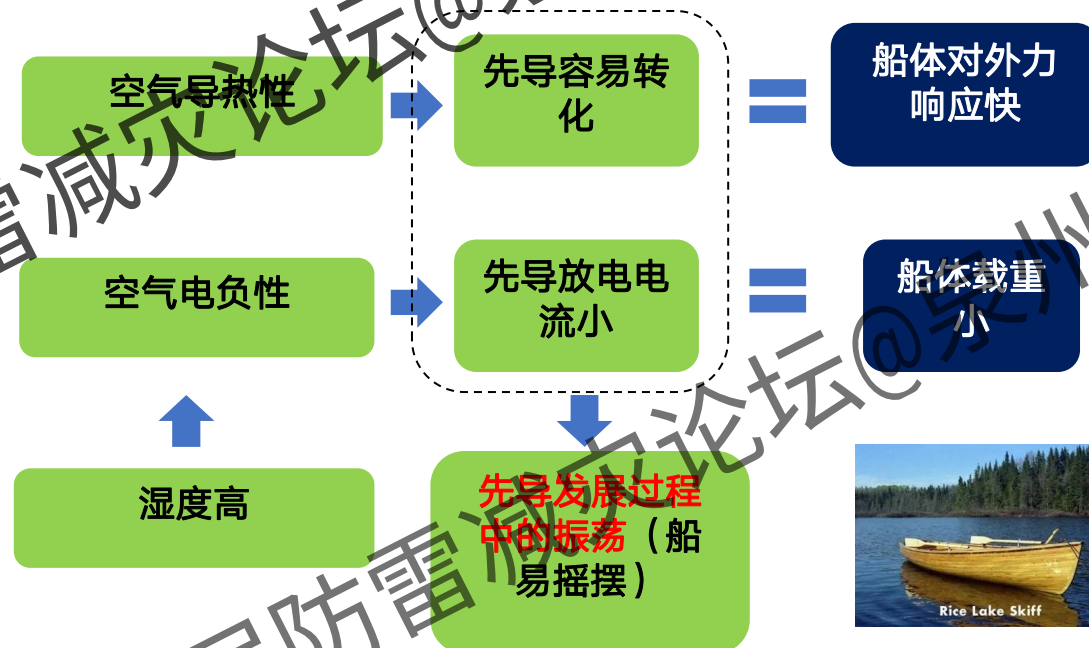
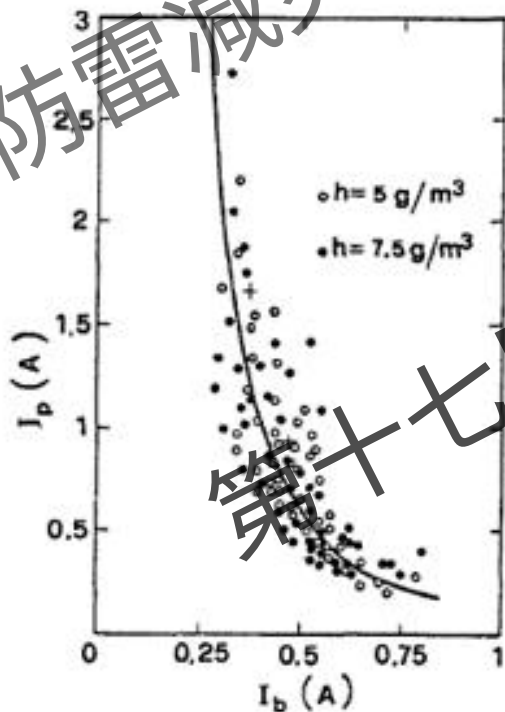


第2类Restrike过程电流测量结果 (Yue et al., 2015)

03 研究进展



- 第2类Restrike伴随的电流脉冲峰值与背景电流呈反比；
- 据此推测：第2类Restrike与湿度导致的先导发展过程中的不稳定性有关。



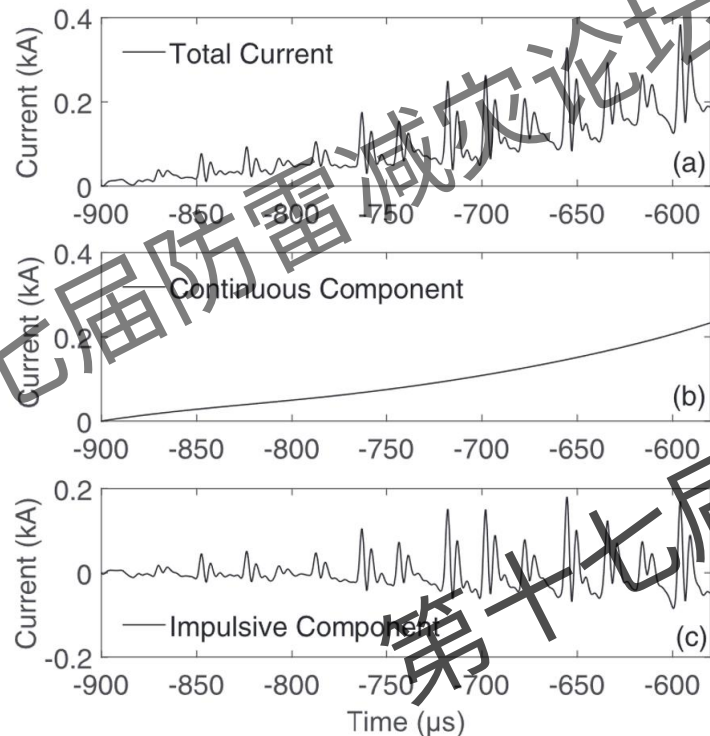
□ 第2类Restrike，背景电流与脉冲电流峰值成反比
(Renardières, 1977)

□ 第2类Restrike机制推测

03 研究进展



- 雷电观测中，正极性先导不稳定发展的某些行为特征与上述两类Restrike的特征均不相符。



不存在电流关断，判断其不属于第1类

Restrike

✓ 伴随的电流脉冲峰值与背景电流成正比，

判断其不属于第2类Restrike

- 正极性雷电先导梯级发展过程电流测量结果

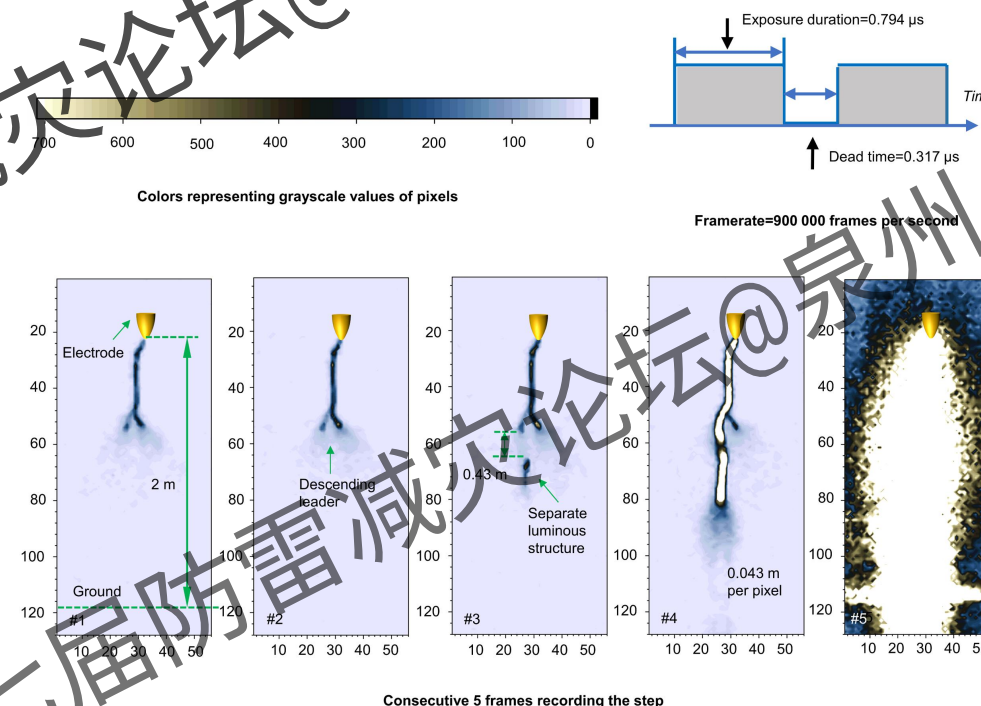
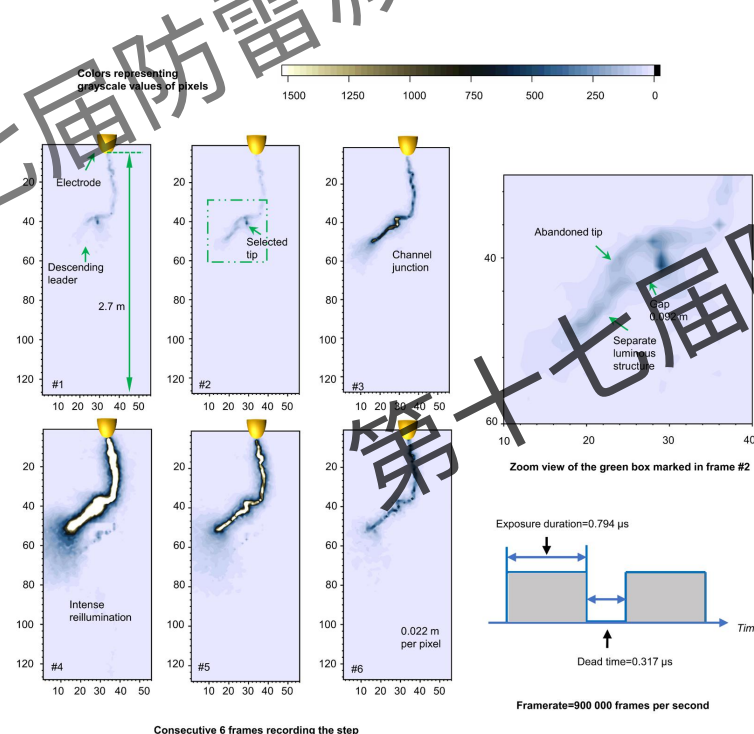
(Gao et al., 2019)

正极性先导能否像负极性先导一样“real step”发展？

03 研究进展



- 在较高湿度（约 20 g/m^3 ）环境下，确存在“孤立发光体”引导的正极性先导梯级发展过程出现于先导连续稳定发展过程中；
- “孤立发光体”形成后，双向发展，前向发展速度可能为背向速度的数倍。



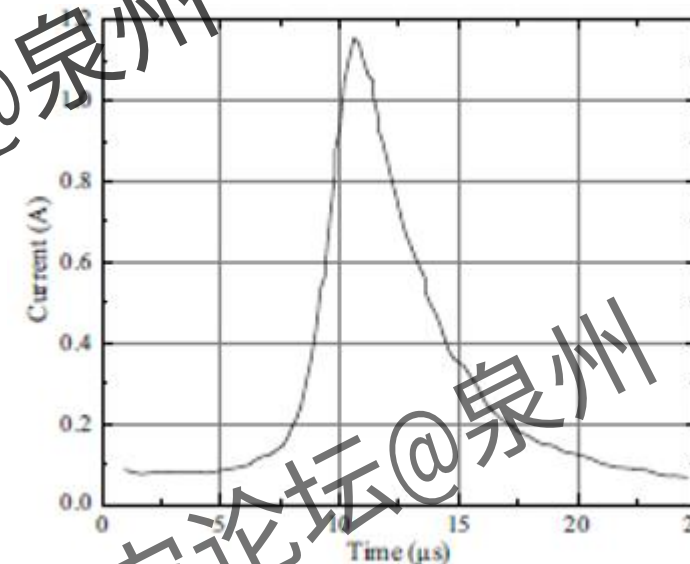
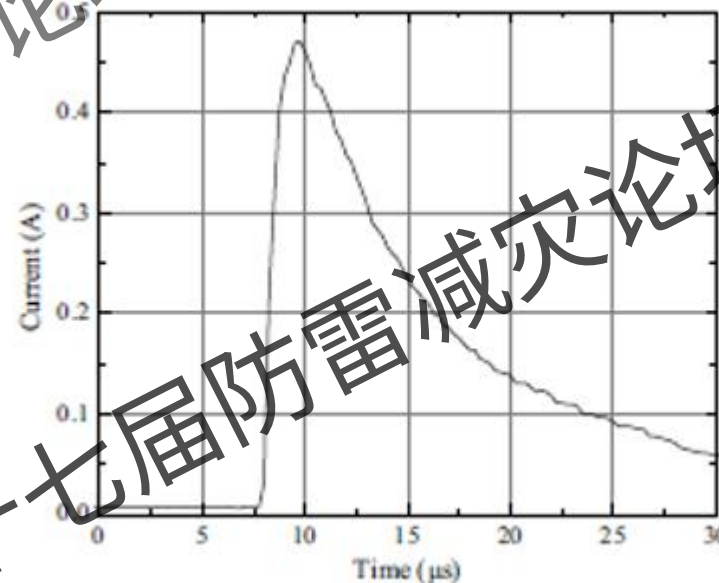
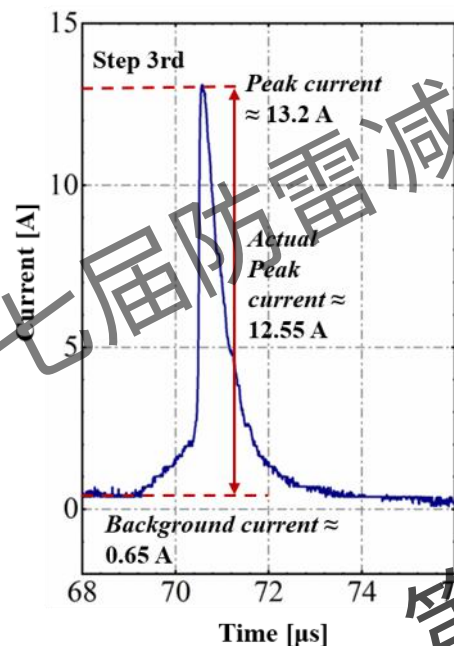
□ “孤立发光体”引导的正极性先导梯级发展过程

□ “孤立发光体”的双向生长过程

03 研究进展



- 正极性先导Step的电流特征与两类Restrike不同。



□ 正极性先导梯级发展过程伴随电流脉冲波形

□ 第1类Restrike过程电流测量结果 (Yue et al., 2015)

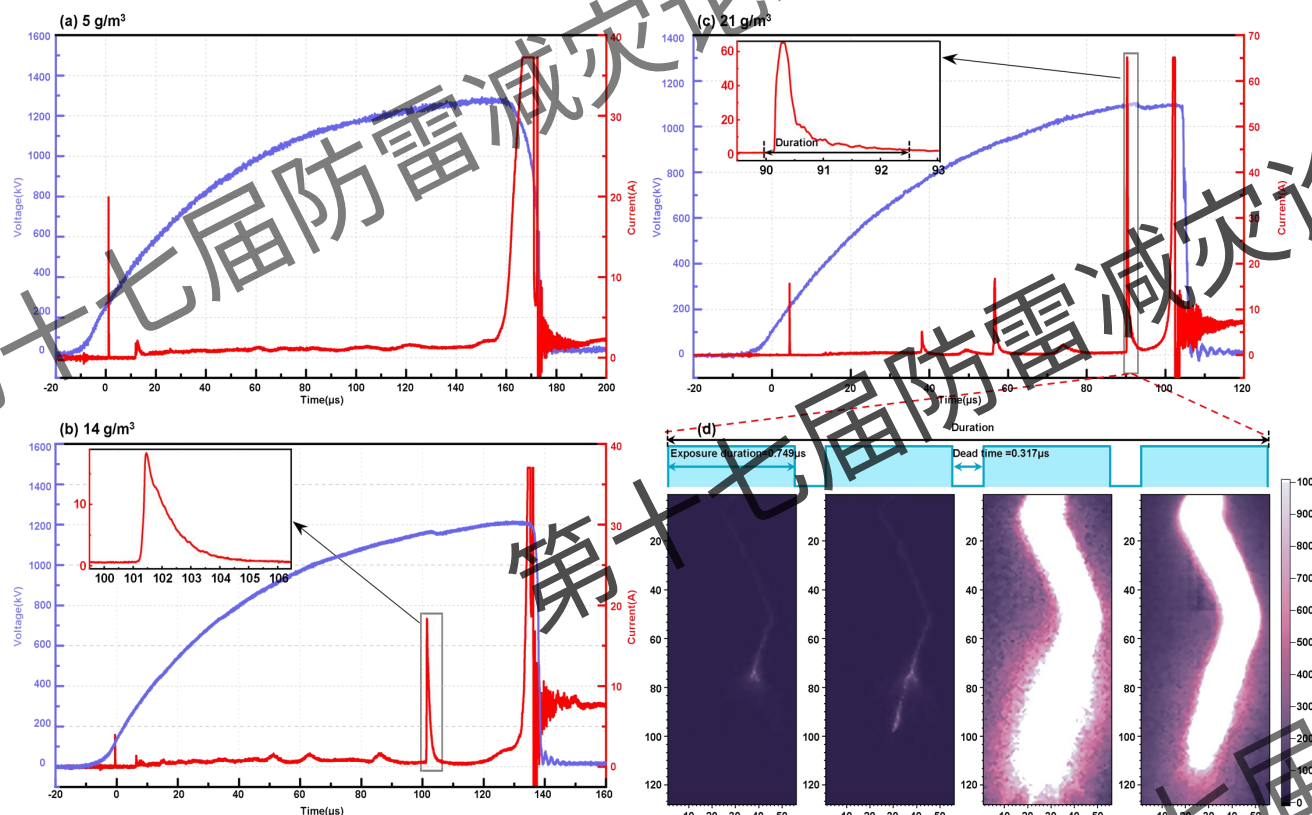
□ 第2类Restrike过程电流测量结果 (Yue et al., 2015)

正极性先导step与两类Restrike是不同的两类放电过程

03 研究进展



- 正极性先导Step的出现主要与环境湿度有关。



- ✓ 正极性先导只出现在环境湿度大于某一阈值时；
- ✓ 随着环境湿度增大，正极性先导梯级发展频次增加。

□ 不同环境湿度下正极性先导放电过程

03 研究进展



小结:

- 实验室中, 正极性先导主要以稳定连续的模式发展;
- 在某些条件下, 正极性先导存在2种Restrike放电行为;
- 当环境湿度大于某一阈值时, 正极性先导在连续发展过程中会出现梯级发展行为, 从而表现出连续-梯级交替的发展模式。



01 研究背景

02 研究方法

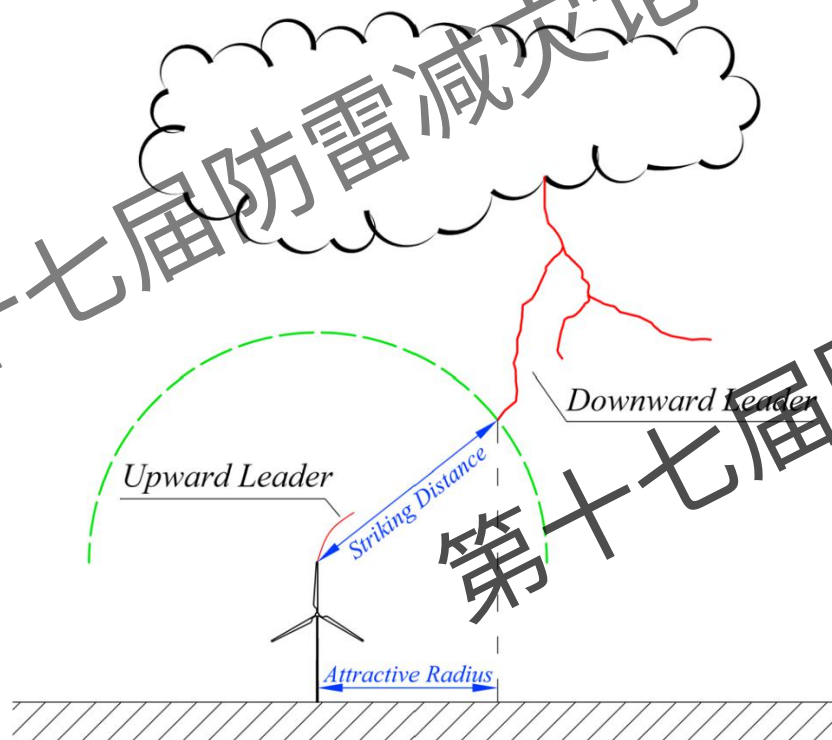
03 研究进展

04 研究展望

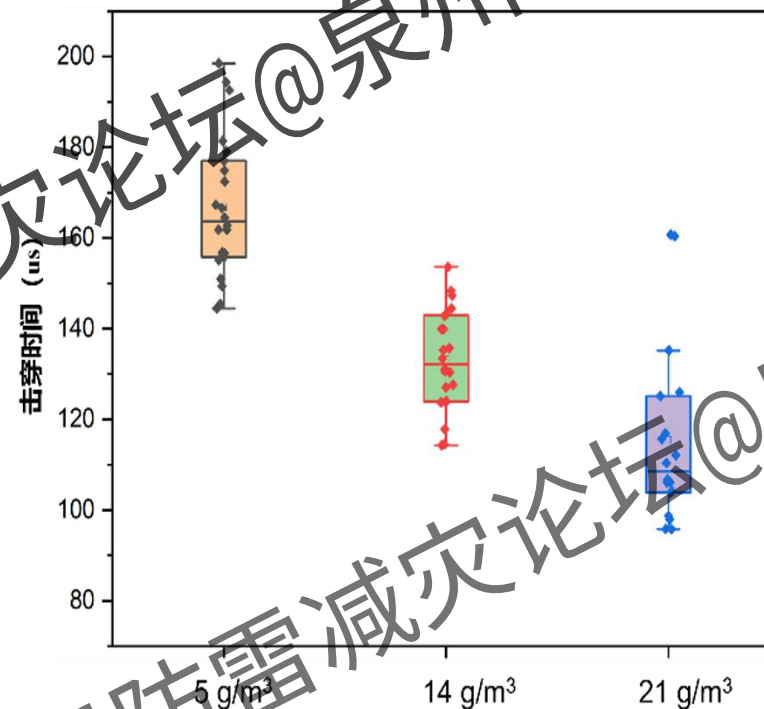
04 研究展望



- 在应用先导发展模型进行地面目标物雷电屏蔽分析时亟待考虑正极性迎面先导梯级发展行为。



- 应用先导发展模型进行风电机组雷击屏蔽分析的概念图 (Yang et al., 2017)



- 不同环境湿度下正极性先导放电时间缩短, 平均速度增加



谢谢各位专家、老师!

恳请各位专家、老师多批评、多帮助!

(Email: huangsx@hfut.edu.cn)