

依据光谱研究闪电回击通道核心的特征参数

刘国荣¹, 安婷婷², 万瑞斌², 袁萍^{2*}, 王雪娟³, 岑建勇⁴, 程和田², 郭志艳²

1. 兰州理工大学理学院物理系, 甘肃 兰州 730050
2. 西北师范大学物理与电子工程学院, 甘肃 兰州 730070
3. 南京信息工程大学大气物理学院, 江苏 南京 210044
4. 山西师范大学物理与信息工程学院, 山西 临汾 041004

摘要 闪电回击通道核心中的大电流及其强电磁辐射是引发多种雷电灾害的主要根源。随着现代科技的飞速发展, 闪电防护工作显得越为重要。为了完善闪电防护系统, 需要从描述闪电回击通道核心的特征参数入手深入研究闪电通道形成和发展过程的微观物理机制。截至目前, 光谱观测是获取闪电通道核心特征参数的最佳手段。2015年夏天在青海高原地区的野外试验中, 利用由高速摄像机作为记录系统组装的无狭缝光栅摄谱仪, 结合快天线地面电场测量仪, 记录到一次包括四个回击的云地闪电放电过程的光谱以及与之同步的快电场变化信息。依据光谱, 结合等离体理论计算得到闪电回击通道核心的电导率。在此基础上, 应用闪电电动力学模型计算了闪电回击速度、峰值电流、贯穿通道核心的电磁场以及通道核心单位长度的峰值功率等特征参数。结果表明, 回击速度在 $(1.2\sim 2.3)\times 10^8\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的范围内; 贯穿回击通道核心的轴向电场、径向电场和磁感应强度的最大值分别在 $(1.42\sim 1.74)\times 10^5\text{ V}\cdot\text{m}^{-1}$, $(8.22\sim 9.99)\times 10^8\text{ V}\cdot\text{m}^{-1}$ 和 $(1.51\sim 2.83)\text{ T}$ 的范围内。当闪电回击的峰值电流在 $(7.52\sim 24.05)\text{ kA}$ 的范围内时, 回击通道核心的峰值功率在 $(0.63\sim 1.92)\times 10^9\text{ W}\cdot\text{m}^{-1}$ 的范围内。另外, 分析了电导率、起始电场峰值、回击速度和峰值电流与峰值功率之间的相关性, 结果发现峰值电流和峰值功率具有良好的线性关系。研究结果可为探索闪电回击通道形成和发展过程的微观物理机制提供参考依据。

关键词 闪电光谱; 回击通道核心; 特征参数; 物理机制

中图分类号: O536 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2021)10-3269-07

引言

一次闪电放电过程主要包括起始击穿、先导和回击等过程。闪电回击瞬间, 通道核心中的大电流及其强电磁辐射对地面建筑物、森林、轨道交通、无线通讯、飞行器和精密设备等有巨大的破坏作用, 甚至还威胁到人畜生命。为了完善闪电防护系统, 需要从描述闪电回击通道核心的特征参数入手, 深入研究通道形成和发展过程的微观物理机制。国内外基于高速光学图像和电磁场等信息开展闪电研究, 已取得许多有价值的成果^[1-2]。然而, 这些资料难以获得反映闪电放电通道内部物理特性的参数。基于光谱研究闪电回击通道核心的特征参数可为探索闪电通道形成和发展过程的微观物理

机制, 进而为优化防雷系统提供参考依据。

近年来, 利用由高速摄像机作为记录系统的无狭缝光栅摄谱仪捕获到了闪电先导、回击以及球状闪电的光谱, 取得了不少有价值的研究成果^[3-5]。2017年, Warner报道了时间分辨率为 $1.5\mu\text{s}$ 左右、波长范围分别为 $380\sim 620$ 和 $620\sim 870\text{ nm}$ 的人工触发闪电起始阶段、直窜先导、回击和连续电流阶段的光谱^[6]。2019年 Warner基于光谱资料和通道底部电流分析了闪电回击通道的相关物理特性^[7]。

本工作利用由高速无狭缝光栅摄谱仪获取的能够反映闪电通道内部信息的高时空分辨光谱, 结合快电场仪记录的同时电场资料, 应用闪电电动力学模型^[8]计算了闪电回击速度、峰值电流、贯穿通道核心的电磁场以及通道核心单位长度的峰值功率等特征参数。另外, 通过分析发现峰值电流和

收稿日期: 2021-01-25, 修订日期: 2021-04-12

基金项目: 甘肃省科技计划-自然科学基金项目(20JR10RA157), 国家自然科学基金项目(62065011), 兰州理工大学高等教育研究项目(GJ2020B-38)资助

作者简介: 刘国荣, 1972年生, 兰州理工大学理学院物理系讲师 e-mail: liugr07@163.com

* 通讯作者 e-mail: yuanp@nwnu.edu.cn

峰值功率具有良好的线性关系。

1 理论方法

在闪电电动力学模型中^[8], 回击击穿脉冲被看作是由具有良好导电性能的通道核心所引导的电磁波。当回击电流进入通道时, 发起电磁波。

1.1 通道核心的电磁场

根据闪电电动力学模型, 柱坐标 (r, θ, z) 下圆柱形闪电通道核心附近电场的轴向分量 E_z 用式[1(a,b)]表示^[8]

$$E_z = aI_0(\gamma_{in}r)e^{i\kappa z - i\omega t} \quad r \leq r_{ch} \quad (1a)$$

$$E_z = bK_0(\gamma_{out}r)e^{i\kappa z - i\omega t} \quad r \geq r_{ch} \quad (1b)$$

式中, r 是距通道核心的距离, θ 是方位角, z 是沿着通道核心轴的变量, a 和 b 是具有电场单位的场幅(复常数), $I_0(\gamma r)$ 和 $K_0(\gamma r)$ 是修正的贝塞尔函数(γ 是场的径向波数, 其中, $\gamma_{in} = \pm \sqrt{\kappa^2 - \omega^2/c^2 - i4\pi\sigma_{ch}\omega/c^2}$ 和 $\gamma_{out} = \pm \sqrt{\kappa^2 - \omega^2/c^2}$ 分别是 γ 在核心通道内部和外部的表达式), $e^{i\kappa z - i\omega t}$ 是具有谐波依赖的场解(其中, κ 是与通道核心平行的轴向波数, $\omega = 1/\Delta t$ 是角频率, Δt 是回击波在通道中的上升时间), r_{ch} 是通道核心半径。另外, c 是光速, σ_{ch} 是通道核心的电导率(在通道核心内部, σ_{ch} 取常量; 在通道核心外部, σ_{ch} 取零)。在通道核心外部, 当 $r \rightarrow \infty$ 时, $K_0(\gamma r) \rightarrow 0$; 在通道核心内部, 当 $r \rightarrow 0$ 时, $I_0(\gamma r) \rightarrow 0$ 是有限且非零的。

电场的径向分量 E_r 分别用式[2(a,b)]表示^[8]

$$E_r = -a \frac{i\kappa}{\gamma_{in}} I_1(\gamma_{in}r)e^{i\kappa z - i\omega t} \quad r \leq r_{ch} \quad (2a)$$

$$E_r = b \frac{i\kappa}{\gamma_{out}} K_1(\gamma_{out}r)e^{i\kappa z - i\omega t} \quad r \geq r_{ch} \quad (2b)$$

这里, $I_1(\gamma r) = I'_0(\gamma r)/r$ 和 $K_1(\gamma r) = -K'_0(\gamma r)/r$ 。

同样, 磁感应强度的 θ 分量 B_θ 分别用式[3(a,b)]表示^[8]

$$B_\theta = -a \frac{ic}{\omega} \gamma_{in} (\kappa^2/\gamma_{in}^2 - 1) I_1(\gamma_{in}r)e^{i\kappa z - i\omega t} \quad r \leq r_{ch} \quad (3a)$$

$$B_\theta = b \frac{ic}{\omega} \gamma_{out} (\kappa^2/\gamma_{out}^2 - 1) K_1(\gamma_{out}r)e^{i\kappa z - i\omega t} \quad r \geq r_{ch} \quad (3b)$$

1.2 色散方程和回击速度

根据闪电通道核心的边界条件, 可以获得关于轴向波数 $\kappa = \kappa(\omega, r_{ch}, \sigma_{ch})$ 的色散方程, 其形式如式(4)^[8]

$$-\left[\kappa^2 - \frac{\omega^2}{c^2}\right] r_{ch}^2 \ln\left(0.8905 \left[\kappa^2 - \frac{\omega^2}{c^2}\right]^{\frac{1}{2}} r_{ch}\right) = \pm (1-i) \frac{r_{ch}}{\delta_{ch}} \frac{\omega}{4\pi\sigma_{ch}} \frac{I_0\left[\pm(1-i) \frac{r_{ch}}{\delta_{ch}}\right]}{I_1\left[\pm(1-i) \frac{r_{ch}}{\delta_{ch}}\right]} \quad (4)$$

式(4)中, $\delta_{ch} = \sqrt{c^2/2\pi\sigma_{ch}\omega}$ 是通道核心的趋肤深度。

求解色散方程后, 可得到群速度

$$v_{group} = \partial\omega/\partial\kappa \quad (5)$$

式(5)中, 群速度 v_{group} 的实部就是波模沿通道移动的速度 v , 即闪电回击速度。

1.3 回击峰值电流和场幅

基于传输线模型, 电流峰值 I 与起始电场变化峰值 E_{init}

之间的关系, 表达式如式[6(a,b)]

$$I = 2\pi\epsilon_0 v DE_{init}, \quad (D \leq 10 \text{ km}) \quad (6a)$$

$$I = \frac{2\pi\epsilon_0 c^2 DE_{init}}{v}, \quad (D \geq 10 \text{ km}) \quad (6b)$$

式中, D 是观测点到闪电通道的距离, v 是前面定义的可以由式(5)获得的闪电回击速度。

在闪电电动力学模型中, 回击发生时, 通道核心中的电流可以由式(7)给出^[8]

$$I = (1+i)a\pi\sigma_{ch}\delta_{ch}r_{ch}I_1\left((1-i)\frac{r_{ch}}{\delta_{ch}}\right)e^{i\kappa z - i\omega t} \quad (7)$$

由式(6)和式(7)联立可以求得场幅 a 的值。根据法拉第定律, 电场的轴向分量 E_z 在通道核心表面是连续分布的, 所以场幅 b 的值可以由式(1a)和式(1b)联立得到。

1.4 回击峰值功率

根据闪电电动力学模型^[8], 通道核心单位长度的峰值功率通过式(8)给出

$$p = -bb^* \frac{ic^2}{4\omega} \left(\frac{\kappa^*}{\gamma_{out}^*} - 1\right) \times \ln(0.8905\gamma_{out}r_{ch}) \quad (8)$$

1.5 电导率

依据经典等离子体的输运规律, 粒子间的碰撞是引起各物理量输运的主要原因。在局部热力学平衡条件下, Capitelli 等利用粒子间的碰撞积分, 给出了温度低于 100 000 K 时, 空气等离子体的电导率为

$$\sigma = 3n_e^2 e^2 \sqrt{\frac{\pi}{2m_e kT}} \left| \begin{matrix} q^{11} & q^{12} \\ q^{21} & q^{22} \end{matrix} \right| \left[\begin{matrix} q^{00} & q^{01} & q^{02} \\ q^{10} & q^{11} & q^{12} \\ q^{20} & q^{21} & q^{22} \end{matrix} \right]^{-1} \quad (9)$$

式(9)中, n_e 为电子密度; m_e 为电子质量; k 为玻尔兹曼常数; T 为通道温度; q^{mp} 是由通道内的粒子数密度、电子密度以及碰撞积分决定。

对于闪电等离子体, 回击过程通道的温度大约为 30 000 K, 且通道满足局域热力学平衡条件, 因此用式(9)计算闪电回击通道的电导率获得的结果更好。

2 结果与讨论

所分析的云地闪电包括四个回击。数据来源于 2015 年夏季在中国青海高原地区进行的野外实验, 实验中使用以高速摄像机(Phantom M310)为记录系统的光谱仪获得了闪电的光谱图片。高速摄像机的记录速度是 9 000 帧每秒, 相应的曝光时间为 110 μ s。所记录的光谱在 400~900 nm 的波长范围内。同时, 利用快天线闪电电场变化仪获得了闪电地面同步电场变化资料。根据闪电产生的光和声传播到观测点的时间差, 估算观测点到闪电发生点的距离约为 10.5 km。用符号 R1—R4 标记闪电的不同回击, 其中 R1 表示首次回击, R2—R4 表示继后回击。

记录到该闪电的每一个回击光谱, 其原始光谱是云外整个放电通道的数字图像, 如图 1 所示。在做定量分析时, 根据通道形状和光谱分辨率选择了通道上的最佳位置(图 1 中箭头所示), 然后将图像转换为由谱线相对强度分布表示的光谱图。图 2(a—d)所示为在采样位置测量的四个回击的光谱图, 横坐标表示波长, 单位为纳米; 纵坐标表示任意单位

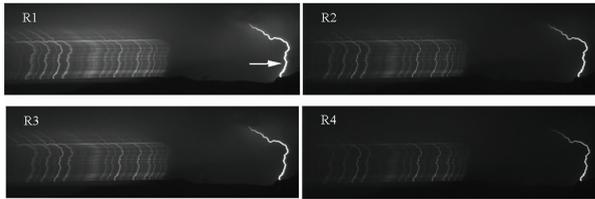


图 1 闪电回击通道的原始光谱图

Fig. 1 The original spectra of lightning return stroke channels

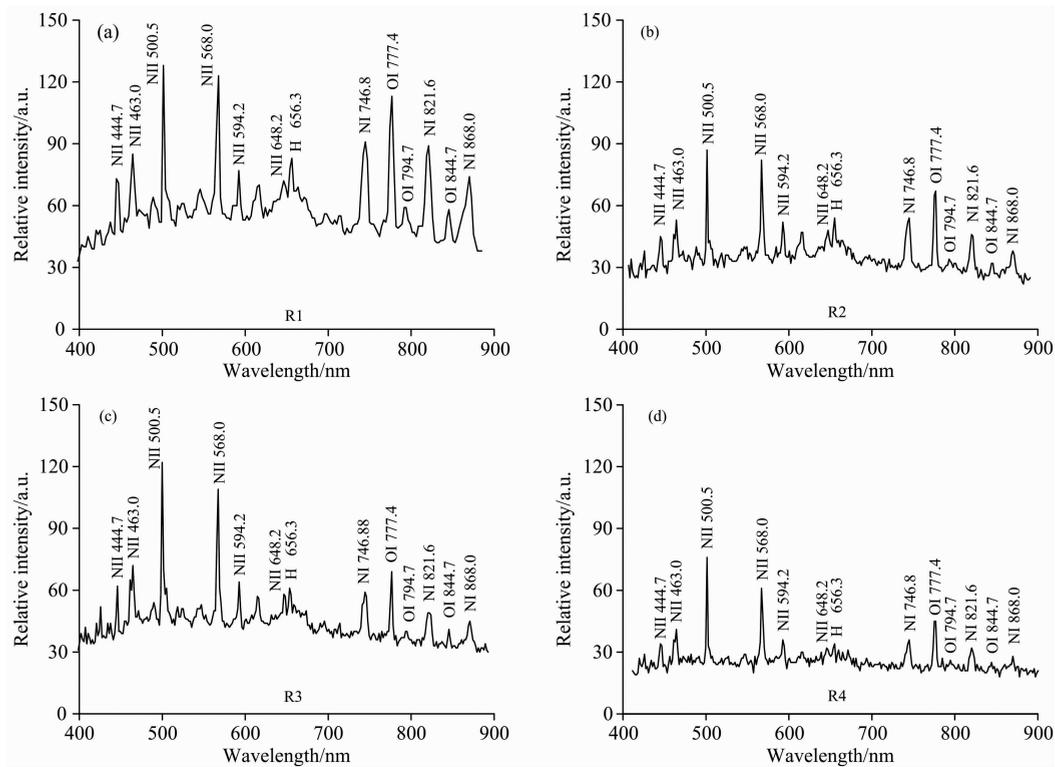


图 2 闪电回击通道某一位置的光谱图

(a): 首次回击 R1 的光谱图; (b): 继后回击 R2 的光谱图; (c): 继后回击 R3 的光谱图; (d): 继后回击 R4 的光谱图

Fig. 2 The spectra of lightning return stroke channels at a given height

(a): The spectra of first return stroke R1; (b): The spectra of subsequent return stroke R2;

(c): The spectra of subsequent return stroke R3; (d): The spectra of subsequent return stroke R4

闪电回击通道核心的半径与离子线的总强度相关，而闪电回击通道的发光半径与光谱的总强度相关^[9]。图 3 展示了每个回击的发光通道和发光像素的灰度值曲线。结合图 2 和图 3，可得到每次回击的通道核心半径与发光半径的比值。将 R4 的通道核心半径设为典型值 0.10 cm，通过计算可以得到其他回击的通道核心半径。计算得到的四个回击通道核心的半径在 0.10~0.17 cm 范围内，平均值为 0.13 cm。Uman^[10]通过观测由闪电损坏的玻璃纤维网上的小孔得到通道核心的直径分别在 2~2.5 和 2~5 mm 范围，Borovsky^[8]所取通道核心的典型值为 0.15 cm。表明通过离子线总强度和光谱总强度的比值获得的各回击通道核心半径之间的比例关系是合理的。

如图 4 所示的是由闪电引起的快电场变化波形。横坐标

下的谱线相对强度。从图 2 看到，可见光波段谱线主要是激发能较高的氮离子谱线(N II)，红外波段谱线主要是激发能较低的中性氮原子谱线(N I)和中性氧原子谱线(O I)。同时可以看到首次回击的谱线明显比其他几个回击强。

根据光谱信息，用玻尔兹曼图(多谱线)法计算得到回击通道核心的温度，并利用 Saha 方程计算得到回击通道核心的电子密度，进一步利用式(9)计算得到四个回击通道核心的电导率，结果在 $(1.44\sim 1.66)\times 10^4\text{ S}\cdot\text{m}^{-1}$ 范围内，平均值为 $1.55\times 10^4\text{ S}\cdot\text{m}^{-1}$ 。

和纵坐标分别表示时间和电场的变化。从图中可以看到，首次回击 R1 产生的电场变化较大，继后回 R2, R3 和击 R4 相对较小。从图 4 可以获得电场变化的初始峰值 E_{init} ^[11]和初始峰值从 10%~90% 的上升时间 Δt ^[12]，结果如表 1 所示。从获得的结果可知，首次回击 R1 的初始峰值 E_{init} 也比其他三个回击的大。这表明，光学资料和电学资料所反映的闪电相关信息是一致的。

表 1 列出了从光谱信息和同步电场资料获得的同一闪电四个回击的参数。 r_{ch} 是通道核心半径，四个回击的平均值为 0.13 cm; σ_{ch} 是通道核心的电导率，平均值为 $1.55\times 10^4\text{ S}\cdot\text{m}^{-1}$; E_{init} 是回击起始电场峰值，平均值为 $217\text{ V}\cdot\text{m}^{-1}$; Δt 是初始峰值从 10%~90% 的上升时间，平均值为 604 ns^[12]。

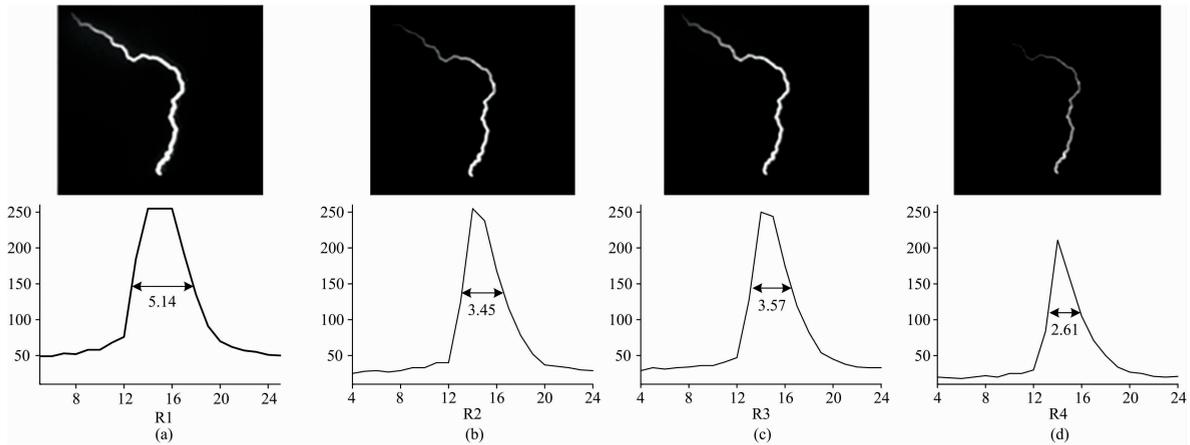


图 3 由发光像素表示的闪电回击通道的发光半径

(a): R1 通道; (b): R2 通道; (c): R3 通道; (d): R4 通道

Fig. 3 The luminous radius of lightning return stroke channels at a given height by luminous pixels

(a): R1 passageway; (b): R2 passageway; (c): R3 passageway; (d): R4 passageway

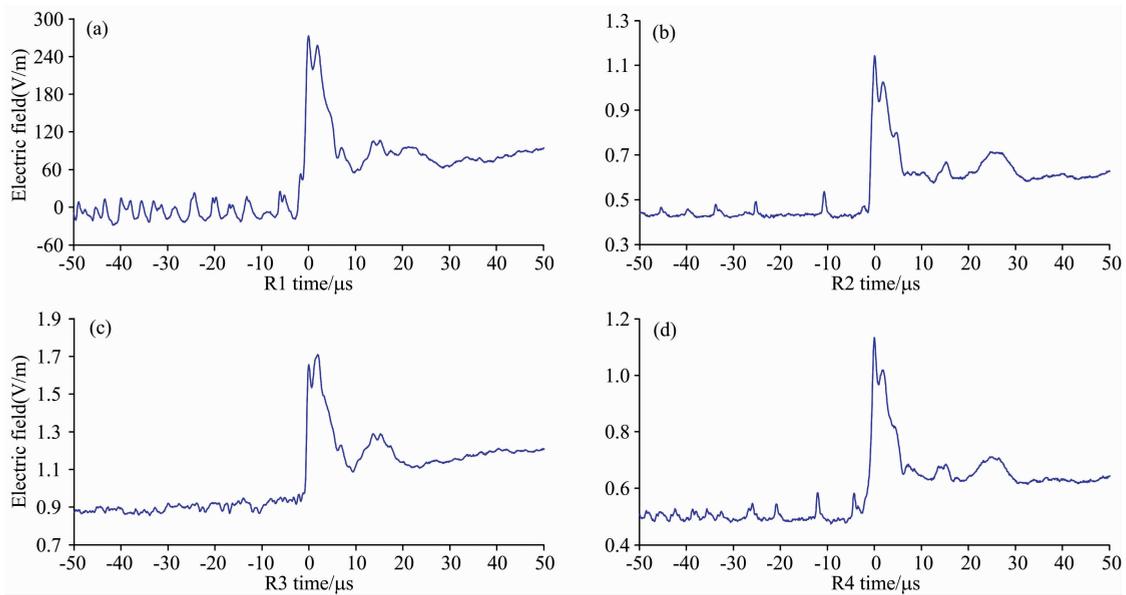


图 4 闪电引起的快电场变化波形

(a): R1 通道; (b): R2 通道; (c): R3 通道; (d): R4 通道

Fig. 4 The waveform of fast electric field change caused by lightning

(a): R1 passageway; (b): R2 passageway; (c): R3 passageway; (d): R4 passageway

表 1 闪电回击基本参数

Table 1 The basic parameters of lightning return stroke

| 回击 | $r_{ch}/$ cm | $\sigma_{ch}/$ ($\times 10^4 \text{ S} \cdot \text{m}^{-1}$) | $E_{init.}/$ ($\text{V} \cdot \text{m}^{-1}$) | $\Delta t/$ ns |
|-----|-----------------|---|--|-------------------|
| R1 | 0.17 | 1.66 | 280 | 571 |
| R2 | 0.12 | 1.54 | 201 | 778 |
| R3 | 0.14 | 1.55 | 208 | 416 |
| R4 | 0.10 | 1.44 | 178 | 649 |
| 平均值 | 0.13 | 1.55 | 217 | 604 |

在电导率 σ_{ch} 、通道核心半径 r_{ch} 和上升时间 Δt ($\omega = 1/\Delta t$) 已知的情况下, 通过数值方法在 κ 的复平面上求解以复

数 κ 为变量的色散式(4), 然后通过式(5)可获得回击速度 v , 计算所得的回击速度在 $(1.2 \sim 2.3) \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 范围内, 平均值为 $1.8 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Idone, Willett 和 Mach 等小组测到的回击速度在 $(1 \sim 2.5) \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 范围内。

结合电场变化的起始峰值 $E_{init.}$ 、观测距离 D 和回击速度 v , 各个回击的峰值电流 I 可以通过式[6(a,b)]计算得到。闪电回击的峰值电流在 $7.52 \sim 24.05 \text{ kA}$ 的范围内, 平均值为 14.55 kA 。常见负地闪回击峰值电流的典型值是 20 kA , 变化范围为 $2 \sim 200 \text{ kA}$ 。

贯穿通道核心的电磁场则可分别由式[1(a,b)]、式[2(a,b)]和式[3(a,b)]计算得到。计算所得的回击通道核心的

轴向、径向电场和磁感应强度的最大值分别在 $(1.42 \sim 1.74) \times 10^5 \text{ V} \cdot \text{m}^{-1}$, $(8.22 \sim 9.99) \times 10^8 \text{ V} \cdot \text{m}^{-1}$ 和 $1.51 \sim 2.83 \text{ T}$ 范围内, 相应的平均值分别为 $1.60 \times 10^5 \text{ V} \cdot \text{m}^{-1}$, $8.83 \times 10^8 \text{ V} \cdot \text{m}^{-1}$ 和 2.09 T 。从计算结果可知, 贯穿通道核心的径向电场比轴向电场大三个数量级。即使较小的轴向电场也比空气击穿电场整整大两个数量级。如此强的电场, 导致大量电荷快速在通道核心中运动的同时, 通道核心迅速向外扩展, 并释放巨大能量。

最后通道核心单位长度的峰值功率由式(8)计算可得, 所得结果在 $(0.63 \sim 1.92) \times 10^9 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1}$ 范围内, 平均值为 $1.18 \times 10^9 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1}$ 。Borovsky^[8] 选取典型值计算的结果是

$3.0 \times 10^9 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1}$ 。回击通道在短时间内释放大量能量是导致各种雷电灾害的直接原因。

表 2 列出了通过计算得到的四个回击通道核心的特征参数。为了进一步分析通道核心各物理参数与单位长度峰值功率之间的关系, 选择通道内部的电导率、回击速度、起始电场峰值和回击峰值电流分别与峰值功率做了线性相关性分析, 所得结果如图 5 所示。其中图 5(a)是电导率与单位长度峰值功率的线性相关性分析, 图 5(b)是回击速度与单位长度峰值功率的线性相关性分析, 图 5(c)是电场起始峰值与单位长度峰值功率的线性相关性分析, 图 5(d)是回击峰值电流与单位长度峰值功率的线性相关性分析。

表 2 闪电回击通道核心的特征参数

Table 2 The characteristic parameters of the lightning return stroke channel core

| 回击 | $v/(\times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1})$ | I/kA | $E_z/(\times 10^5 \text{ V} \cdot \text{m}^{-1})$ | $E_r/(\times 10^8 \text{ V} \cdot \text{m}^{-1})$ | B_θ/T | $P(\times 10^9 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1})$ |
|-----|---|---------------|---|---|---------------------|--|
| R1 | 2.3 | 24.05 | 1.60 | 9.99 | 2.83 | 1.92 |
| R2 | 1.4 | 9.87 | 1.42 | 8.22 | 1.64 | 0.70 |
| R3 | 2.2 | 16.76 | 1.74 | 8.78 | 2.39 | 1.47 |
| R4 | 1.2 | 7.52 | 1.65 | 8.31 | 1.51 | 0.63 |
| 平均值 | 1.8 | 14.55 | 1.60 | 8.83 | 2.09 | 1.18 |

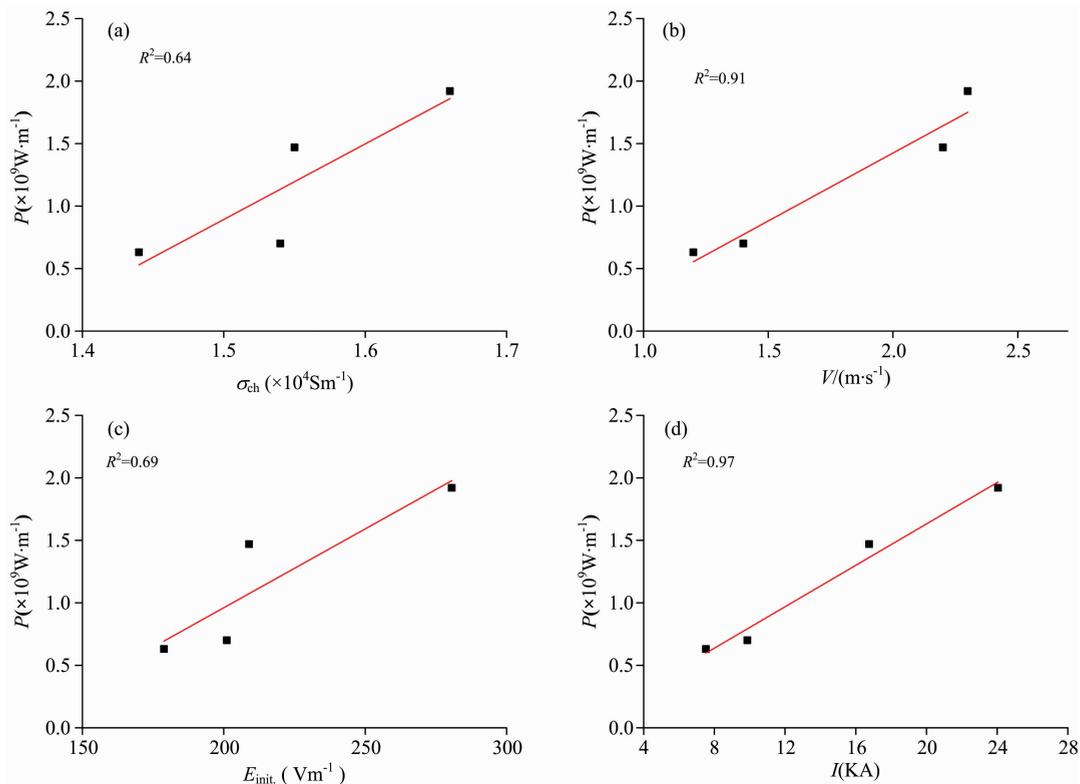


图 5 相关性分析

- (a): 电导率与单位长度峰值功率的相关性分析;
- (b): 回击速度与单位长度峰值功率的相关分析;
- (c): 起始电场峰值与单位长度峰值功率的相关性分析;
- (d): 峰值电流与单位长度峰值功率的相关性分析

Fig. 5 Correlation analyses

- (a): Correlation analysis between the conductivity and the peak power per unit length;
- (b): Correlation analysis between the return stroke speed and the peak power per unit length;
- (c): Correlation analysis between the initial electric field peak and the peak power per unit length;
- (d): Correlation analysis between the peak current and the peak power per unit length

从图 5 可以看到,回击通道核心单位长度的峰值功率与通道核心的电导率和起始电场峰值的相关性较差,与回击速度的相关性较好,与峰值电流的相关性最好。依据闪电电动力学模型,回击速度由通道核心半径、电导率以及回击上升时间三个参数确定,即这三个量对回击速度都有程度不同的影响。同时,回击峰值电流不仅与回击速度有关,还与回击起始峰值有关,因此峰值电流和峰值功率之间具有良好的线性相关性。减轻雷电损害势必减小回击通道单位长度的峰值功率,即必须减小通道核心中的峰值电流。而电流是电荷的定向移动形成的,闪电回击通道核心中的大电流源自云—地(或云—云)间储存的大量异号电荷。云—地(或云—云)间储存的大量异号电荷不仅为大电流提供了“原材料”,也为带电粒子在通道中的高速运动提供了巨大的动力。

3 结 论

依据高时间分辨的光谱资料和同步电场资料,基于闪电电动力学模型计算了描述闪电回击通道核心的特征参数。结果表明,回击速度在 $(1.2\sim 2.3)\times 10^8\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的范围内;回击通道核心的轴向电场、径向电场和磁感应强度的最大值分别在 $(1.42\sim 1.74)\times 10^5\text{ V}\cdot\text{m}^{-1}$, $(8.22\sim 9.99)\times 10^8\text{ V}\cdot\text{m}^{-1}$ 和 $1.51\sim 2.83\text{ T}$ 范围内。当闪电回击的峰值电流在 $7.52\sim 24.05\text{ kA}$ 的范围内时,回击通道核心的峰值功率在 $(0.63\sim 1.92)\times 10^9\text{ W}\cdot\text{m}^{-1}$ 的范围内。另外,分析发现峰值电流和峰值功率具有良好的线性关系。研究结果可为探索闪电回击通道形成和发展过程的微观物理机制,进而为优化雷电防护系统提供参考依据。

References

- [1] WANG Dao-hong, QIE Xiu-shu, GUO Chang-ming(王道洪, 郗秀书, 郭昌明). Lightning and Artificial Triggering Lightning(雷电与人工引雷). Shanghai: Shanghai Jiaotong University Press(上海: 上海交通大学出版社), 2000. 111.
- [2] QIE Xiu-shu, ZHANG Qi-lin, YUAN Tie, et al(郗秀书, 张其林, 袁 铁, 等). Thunder Physics(雷电物理学). Beijing: Science Press(北京: 科学出版社), 2013. 75.
- [3] WANG Xue-juan, YUAN Ping, ZHANG Qi-lin(王雪娟, 袁 萍, 张其林). Spectroscopy and Spectral Analysis (光谱学与光谱分析), 2019, 39(12): 3718.
- [4] Liu G R, Yuan P, An T T, et al. J. Geophys. Res. : Atmos. , 2019, 124: 4689.
- [5] Liu G R, Yuan P, An T T, et al. Appl. Phys. Lett. , 2019, 115: 064103.
- [6] Walker T D, Christian H J. J. Geophys. Res. Atmos. , 2017, 122: 8000.
- [7] Walker T D, Christian H J. J. Geophys. Res. Atmos. , 2019, 124: 3930.
- [8] Borovsky J E. J. Geophys. Res. , 1995, 100(D2): 2697.
- [9] Wang X J, Yuan P, Cen J Y, et al. J. Geophys. Res. Atmos. , 2017, 122: 4993.
- [10] Uman M A. J. Geophys. Res. , 1964, 69: 583.
- [11] Haddad M A, Rakov V A, Cummer S A. J. Geophys. Res. , 2012, 117: D10101.
- [12] Charles D W, Krider E P. Geophys. Res. Lett. , 1980, 7: 955.

Study on the Characteristic Parameters of Lightning Return Stroke Channel Core Based on Spectroscopy

LIU Guo-rong¹, AN Ting-ting², WAN Rui-bin², YUAN Ping^{2*}, WANG Xue-juan³, CEN Jian-yong⁴, CHENG He-tian², GUO Zhi-yan²

1. Department of Physics, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China

2. College of Physics and Electronic Engineering, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China

3. School of Atmospheric Physics, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China

4. School of Physics and Information Engineering, Shanxi Normal University, Linfen 041004, China

Abstract High current and intense electromagnetic radiation in the lightning return stroke channel core are the leading causes of many lightning disasters. With the rapid development of modern science and technology, lightning protection is becoming more and more important. In order to perfect the lightning protection system, it is necessary to investigate the microscopic physical mechanism of the lightning channel formation and development from the characteristic parameters describing the channel core. Up to now, spectral observation is the most effective means to obtain the lightning channel core characteristic parameters. In a field experiment on the Qinghai Plateau in China in the summer of 2015, a slit-less grating spectrometer assembled by a high-speed camera as a recording system was used, combined with a fast antenna ground electric field measuring instrument, the spectra of a cloud-to-ground discharge process including four return strokes and the synchronous fast electric field change information were recorded. According to the spectrum and plasma theory, the conductivity of the lightning return channel core is calculated. On this basis, the lightning electrostatics model is used to calculate the lightning return stroke velocity, peak current, electromagnetic field across the return stroke channel core and peak power per unit length of the channel core. The results show that the return stroke velocity is in the range of $(1.2 \sim 2.3) \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, and the maximum values of the axial electric field, radial electric field and magnetic induction intensity across the return stroke channel core are in the range of $(1.42 \sim 1.74) \times 10^5 \text{ V} \cdot \text{m}^{-1}$, $(8.22 \sim 9.99) \times 10^8 \text{ V} \cdot \text{m}^{-1}$ and $1.51 \sim 2.83 \text{ T}$, respectively. When the peak current is in the range of $7.52 \sim 24.05 \text{ kA}$, the peak power of the return stroke channel core is in the range of $(0.63 \sim 1.92) \times 10^9 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1}$. In addition, the correlations between the electrical conductivity, the initial electric field peak value, the return stroke velocity and the peak current and the peak power are analyzed, it is found that the peak current and peak power has a good linear relationship. The results can provide a reference for further exploring the microscopic physical mechanism of the formation and development of the lightning return stroke channel.

Keywords Lightning spectrum; Return stroke channel core; Characteristic parameters; Physical mechanism

(Received Jan. 25, 2021; accepted Apr. 12, 2021)

* Corresponding author