

关雨依, 吕伟涛, 齐奇, 等. 一次上行闪电中先导二维和三维发展特征的差异. 应用气象学报, 2023, 34(5): 598-607.

DOI: 10.11898/1001-7313.20230508

一次上行闪电中先导二维和三维发展特征的差异

关雨依¹⁾²⁾ 吕伟涛^{2)*} 齐奇²⁾ 武斌²⁾³⁾ 马颖²⁾
陈绿文⁴⁾ 刘恒毅²⁾ 张义军¹⁾

¹⁾(复旦大学大气与海洋科学系/大气科学研究院, 上海 200438)

²⁾(中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室/中国气象局雷电重点开放实验室, 北京 100081)

³⁾(中国气象局气象探测工程技术研究中心, 北京 100081)

⁴⁾(中国气象局广州热带海洋气象研究所, 广州 510641)

摘 要

基于高时空分辨率的广州高建筑物雷电观测站双站(观测点 1 和观测点 2)同步观测资料, 对比分析 2019 年 4 月 20 日 05:12(世界时)发生在广州塔上的一次上行闪电的先导二维和三维发展特征。分析表明: 该上行闪电可三维重建的上行先导通道发展长度约为 5.4 km, 是对应两个观测点二维通道长度的 1.5 倍和 1.38 倍; 由观测点 1 的高速摄像记录分析得到的上行先导二维发展速率变化范围为 $1.8 \times 10^4 \sim 4.5 \times 10^5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (平均值为 $1.8 \times 10^5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$); 对应的上行先导三维发展速率变化范围为 $3.8 \times 10^4 \sim 7.2 \times 10^5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (平均值为 $2.8 \times 10^5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$); 三维和二维发展速率之比变化范围为 1~4.7, 平均值为 1.5; 上行先导始发后 10 ms 内, 三维与二维发展速率的变化趋势大致相同, 均随高度增加而逐渐加快; 10 ms 后二维发展速率明显降低, 平均值仅为 10 ms 内的 42%, 且随时间变化较小。而 10 ms 后的三维发展速率平均值为 10 ms 内的 77%, 随时间呈明显的不规则波动变化; 先导通道与观测点间的距离以及通道发展方向与观测点视线方向的夹角是造成上行先导二维和三维发展速率差异的主要因素。

关键词: 上行闪电; 双站光学观测; 通道三维重建; 三维发展特征; 特征差异

引 言

当雷暴云过境时, 高大建筑物顶部电场受畸变影响易达到先导的始发阈值, 不仅被下行闪电击中的概率较高, 而且会形成上行闪电^[1]。已有观测研究表明: 建筑物越高, 越易发生上行闪电^[2]。近年随着社会经济的发展, 城市中高建筑物不断增加, 高度逐渐增高, 上行闪电事件也逐渐受到人们关注。

自 20 世纪 30 年代以来, 多个科研团队对高建筑物的上行闪电开展了观测研究^[3-4]。根据在日本观测到的 14 例上行闪电的电场变化资料, Wang 等^[5]将上行闪电分为两类: ①附近没有其他放电活

动, 高建筑物顶端自行始发的上行闪电, 称为自发型上行闪电; ②由于附近其他放电活动导致高建筑物顶端电场急剧变化而产生的触发型上行闪电。Lu 等^[6]观测表明: 上行闪电事件可以在附近高塔上触发另一个极性相反的上行闪电。Wang 等^[7]利用高速摄像等资料分析了北京某气象塔(高度为 325 m)上行正先导的传播特征, 得到其平均二维发展速率(简称二维速率)为 $8.1 \times 10^4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。Warner 等^[8]和 Saba 等^[9]在美国和巴西的观测结果表明: 绝大多数上行闪电属于附近闪电活动激发的触发型, 其中正地闪过程更易触发附近高建筑物的上行负极性闪电(始发的先导为上行正先导)。

对于上行闪电, 目前主要借助于分析闪电光学

2023-02-08 收到, 2023-05-25 收到再改稿。

资助项目: 国家自然科学基金项目(42175108), 中国气象科学研究院基本科研业务费专项(2021Z011), 中国气象局气象探测工程技术研究中心和中国气象局大气探测重点开放实验室开放课题(U2021M05)

* 通信作者, 邮箱: wtlyu@cma.gov.cn

图像、地面电场变化、雷电流直接测量、雷达回波等资料,或建立先导随机或物理模型,研究先导传输特征及其触发机制^[10-20]。近年光电技术快速发展使高空分辨率的商业化高速摄像系统在雷电物理过程的观测研究中得到广泛应用,并取得一系列研究成果^[21-25]。高速光学观测不仅能给出先导的发展速率、长度、传输方向等特征参数^[26-31],还可以利用多站光学观测重建闪电三维通道,更准确地描绘先导通道时空发展特征^[32-33]。Markus等^[34]在2008年研发一种从多个角度拍摄闪电过程以重建放电通道的系统。Liu等^[35]提出一种利用两个不同角度的摄像机拍摄闪电通道,进而图形化重建闪电三维通道的方法。Gao等^[36]利用双站光学观测资料分析闪电通道的二维和三维长度,发现一些个例闪电通道的三维长度达到二维长度的2倍以上。

到目前为止,对上行闪电先导三维发展特征的研究报道还很少,主要原因是闪电双站或多站光学同步观测难度较大。相比于单站二维光学观测,利用双站或多站资料重建得到的闪电三维特征更能反映闪电通道时空发展的真实特性。本文利用包括高速摄像及普通摄像的双站光学观测资料,详细对比广州塔一次上行闪电(编号为FA19014)先导的二维和三维发展特征,并讨论二维和三维特征异同及其成因。

其成因。

1 观测与资料

广州高建筑物雷电观测站(Tall-object Lightning Observatory in Guangzhou, TOLOG)建于2009年,经过十余年的发展,目前已形成包括6个观测点的闪电光学观测站网,实现了对广州珠江新城地区高建筑物闪电事件的综合观测^[37-39]。其中,观测点1架设多台高速摄像机、闪电通道成像仪(lightning channel imager, LCI)和全视野闪电通道成像仪(total-sky lightning channel imager, TL-CI)^[40-41]等多种光学观测设备。此外,还架设了大气平均电场仪、快慢天线电场变化仪、闪电低频电场变化探测阵列子站^[42]、闪电磁场变化测量仪、先导电流测量仪等多套设备。其余5个观测点中,观测点2安装2套不同视野的LCI,观测点3分别安装1套LCI和TLCI,观测点4安装1套TLCI,观测点5和观测点6均各安装1套LCI。广州塔是珠江新城区域最高的建筑物,其高度为600 m。TOLOG观测资料显示,每年在广州塔上发生的上行闪电可达数十例。表1为本研究所用的光学观测设备信息。

此外,研究中还采用粤港澳闪电定位系统(Gua-

表1 本研究所用光学观测设备详细信息

Table 1 Details of optical observation instruments in the study

设备编号	观测站点	帧率/s ⁻¹	空间分辨率	记录时长/ms	预触发时长/ms	焦距/mm
HC-1	观测点1	20000	1024 × 1024	50	25	14
HC-3	观测点1	1000	1024 × 1024	1650	150	8
LCI-03	观测点2	50	780 × 582			5

ngdong-Hongkong-Macao Lightning Location System, GHMLLS)提供的闪电极性、回击峰值电流等信息^[43]。GHMLLS建于2005年,由粤港澳三地气象部门共同建立。张悦等^[44]利用人工触发闪电资料对GHMLLS的探测性能评估表明:GHMLLS对于闪电和回击的探测效率分别为96%和88%,回击电流峰值偏差为-37%,定位误差算术平均值和几何平均值分别为198 m和108 m,中值为103 m。

2 上行先导的二维和三维发展特征

2.1 上行闪电FA19014的总体情况

本文分析的广州塔上行闪电FA19014发生于2019年4月20日05:12(世界时),是一次触发型上

行闪电,由附近发生的单回击正地闪过程引发。GHMLLS资料显示正地闪接地点位置距广州塔约7 km,回击峰值电流约为+44 kA。图1为广州塔上行闪电快电场变化和高速摄像图像亮度变化(由HC-1资料获得,是每帧图像上所有像素灰度值总和随时间变化)。为便于分析,本研究将上行先导起始时刻定义为0时刻。如图1所示,在正地闪回击开始后约4 ms上行正先导始发(图1中黑色虚线指示)。

图2为观测点1、观测点2、广州塔、正地闪接地点的相对位置以及观测点1的HC-3和观测点2的LCI-03的视野范围,其中坐标原点是观测点1所在经度和观测点2所在纬度的交点。两站点相距约4.8 km,广州塔距观测点1、观测点2的水平距离分

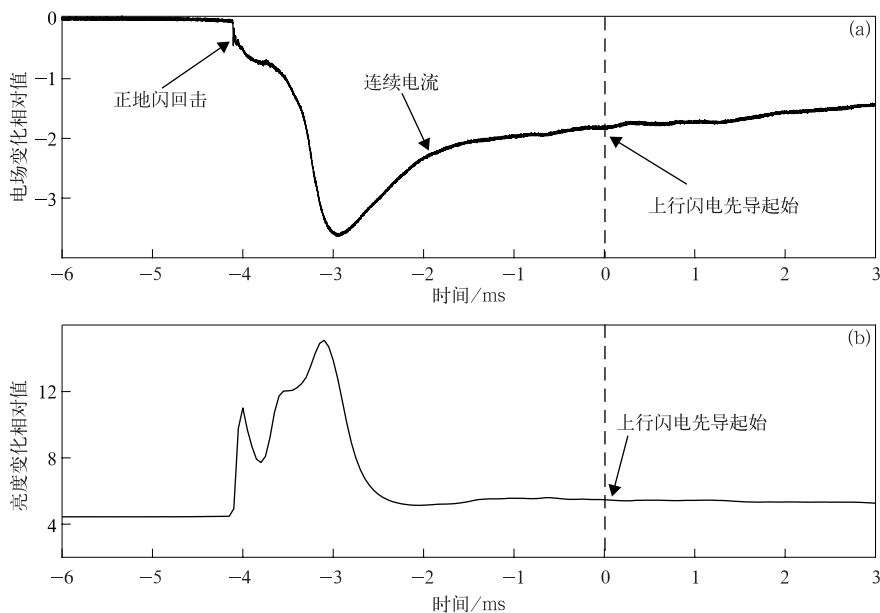


图1 快电场(a)和图像亮度(b)的同步变化波形

Fig. 1 Waveforms of changes in fast electric field(a) and image brightness(b)

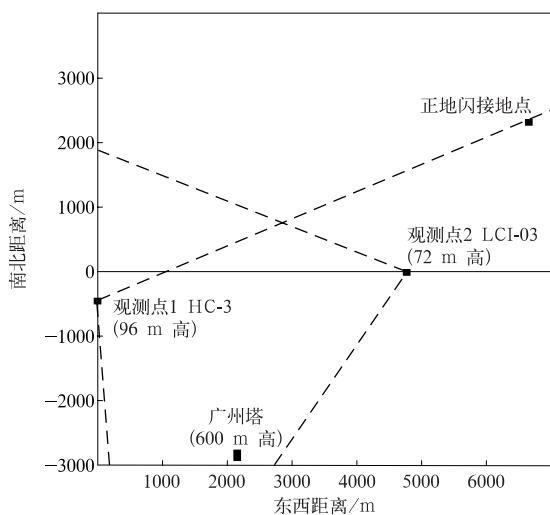


图2 正地闪接地点及观测点1、观测点2与广州塔相对位置

Fig. 2 Positions of Canton Tower relative to ground termination points of positive cloud-to-ground flash, station-1 and station-2

别约 3.3 km 和 3.9 km, 处于双站视野的交叉区域, 上行闪电被观测点 1 的高速摄像和观测点 2 的 LCI 同步记录, 可重建其三维通道。正地闪接地点位于观测点 1 的视野边缘, 仅被观测点 1 的观测设备拍摄到部分通道, 因此无法重建其三维通道。

2.2 上行先导的二维发展特征

观测点 1 的 HC-1 高速摄像资料时间分辨率高 ($50 \mu\text{s}$), 可用于计算上行闪电先导的二维速率。HC-1 拍摄到先导起始后 21.8 ms 内的发展过程, 通过计算得到先导发展过程中 437 个 $50 \mu\text{s}$ 逐帧二维速率样本。在 HC-1 视野范围内, 该上行先导 $50 \mu\text{s}$ 逐帧二维速率变化范围为 $0 \sim 6.3 \times 10^5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 总体平均二维速率为 $1.8 \times 10^5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。因 HC-1 时间分辨率高, 可能由于上行先导发展过程中的停歇(梯级)或者发光较暗, 导致 $50 \mu\text{s}$ 逐帧二维速率出现为 0 的情况。为避免这些因素的影响, 本研究给出 $50 \mu\text{s}$ 逐帧二维速率五点平滑结果, 其变化范围为 $1.8 \times 10^4 \sim 4.5 \times 10^5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

由图 3 可知, 在先导起始后约 10 ms 之内, 平均二维速率为 $2.6 \times 10^5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 明显高于总体平均值, 而起始约 10 ms 后, 平均二维速率为 $1.1 \times 10^5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 明显低于总体平均值, 仅为 10 ms 内平均值的 44%。图 3b 为先导二维速率随二维高度的变化, 在观测视野范围内先导发展的二维高度为 3.8 km。即随着高度的升高, 先导速率呈先增大后减小的趋势, 总体变化趋势与武斌等^[45]对 2017 年一次由正地闪引发广州塔和东塔同时始发上行闪电的研究结果相似。约在先导头部二维高度发展到 2.1 km 时, 二维速率达到最大值。

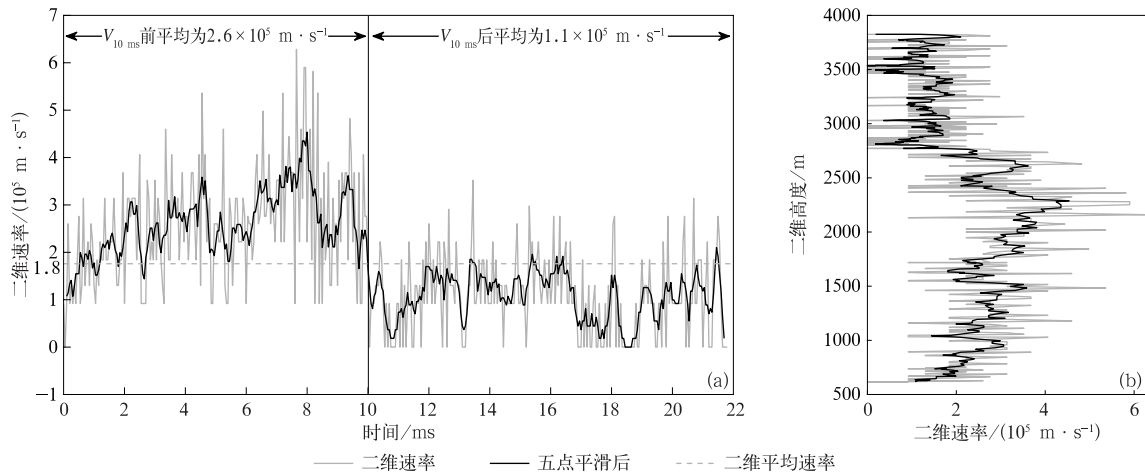


图 3 FA19014 先导二维速率随时间(a)以及随高度(b)变化

Fig. 3 2D leader speed change with time(a) and change with height(b) of FA19014

2.3 上行先导的三维发展特征

观测点 1 的 HC-1 和观测点 2 的 LCI-03 的光学观测资料(图 4)可用于重建此次上行闪电的部分三维通道,分析和研究闪电先导的长度、速率等随时间和高度变化的三维发展特征。本文所用重建方法为空间矢量法^[46],其具体步骤包括:①分别对两张图像进行畸变、水平及梯形校正,以消除因镜头畸变和相机摆放的仰角和倾斜角带来的误差;②识别闪电通道像素坐标,并根据相机的焦距、像素大小及广州塔顶部的像素坐标,将通道中各点像素坐标转换为基于各站点的仰角及方位角坐标;③通过空间矢量运算方法,将双站图像的坐标点相匹配,重建闪电的三维通道坐标序列。图 5 为 FA1914 通道的三维重建结果,其中,坐标原点为观测点 1 经度与观测点

2 纬度的交点,X 轴以正南为正方向,Y 轴以正东为正方向,Z 轴以海平面高度为零值,垂直向上为正方向。

由重建结果可知,这部分通道的三维长度约为 5.4 km,观测点 1 资料中通道长度约为 3.6 km,观测点 2 资料中通道长度约为 3.74 km,重建后的通道长度分别为各站的 1.5 倍和 1.38 倍。由各坐标平面的投影(图 5)可以看到,通道在垂直方向上发展到的三维高度大于 4.6 km,水平方向发展了约 800 m。

本研究将高速摄像(HC-1)资料中逐 5 帧的用于三维重建的先导头部二维像素坐标对应到三维通道中的相应位置,结合时间信息计算得到 74 个先导的三维发展速率(简称三维速率,分辨率为 250 μs)。

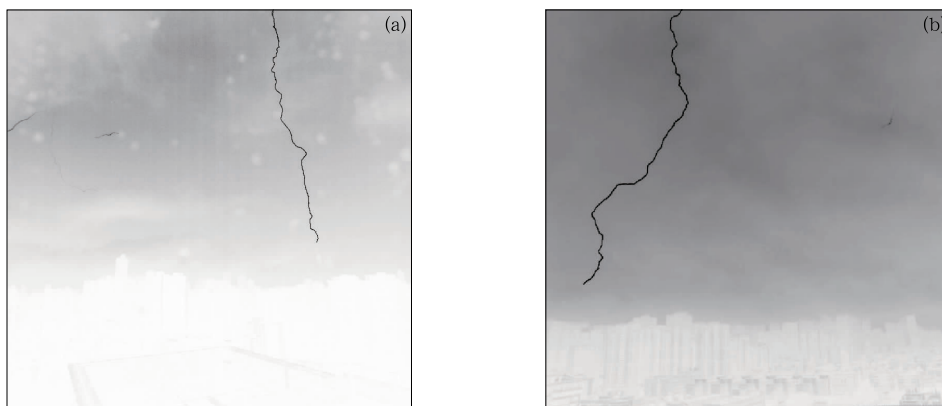


图 4 观测点 1 的 HC-1(a)和观测点 2 的 LCI-03(b)拍摄的此次上行闪电图像

(为提升显示效果,对图像进行反相处理并对闪电通道进行增强)

Fig. 4 Upward lightning images captured by HC-1 at station-1(a) and LCI-03 at station-2(b)

(images are inverted and pixel values of lightning channel in images are enhanced for better display)

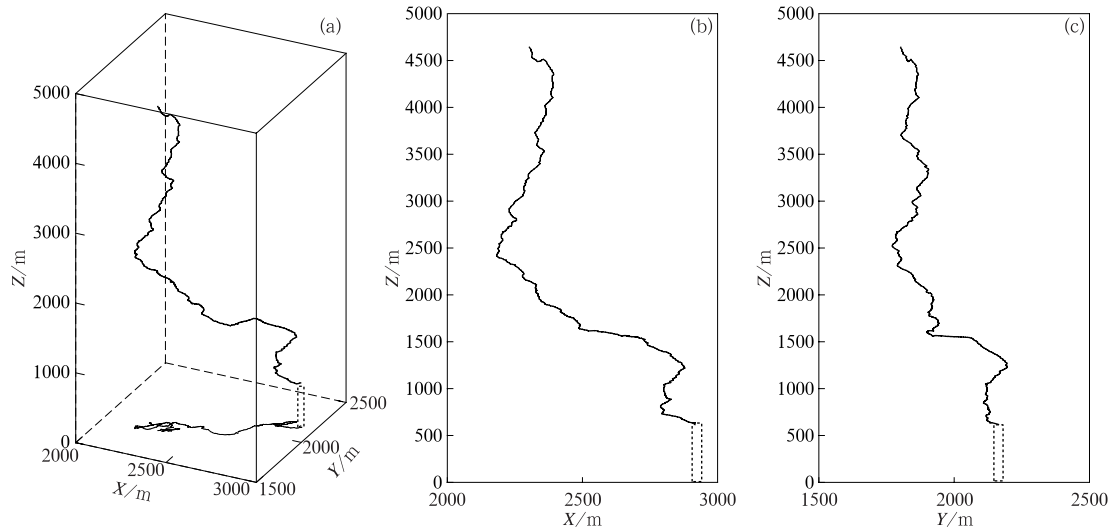


图5 闪电FA19014重建后的三维通道及在X-Y平面投影(a)、X-Z平面投影(b)以及Y-Z平面投影(c)

Fig. 5 3D reconstruction channel of FA19014 and projection view on X-Y plane(a), X-Z plane(b) and Y-Z plane(c)

图6a为其随时间变化,图6b为三维速率随高度变化。由研究结果可知,上行闪电先导的三维速率范围约为 $3.8 \times 10^4 \sim 7.5 \times 10^5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,总体平均值约为 $2.8 \times 10^5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。先导起始后10 ms内,平均三维速率为 $3.1 \times 10^5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,略高于总体平均值。在

起始后约10 ms时三维速率达到最大值,10 ms后的平均三维速率为 $2.4 \times 10^5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,略低于总体平均值,是10 ms内平均值的77%。先导大约发展到2.8 km高度时,三维速率达到最大值,1 ms后先导发展到约2.9 km高度时,三维速率快速降至最小。

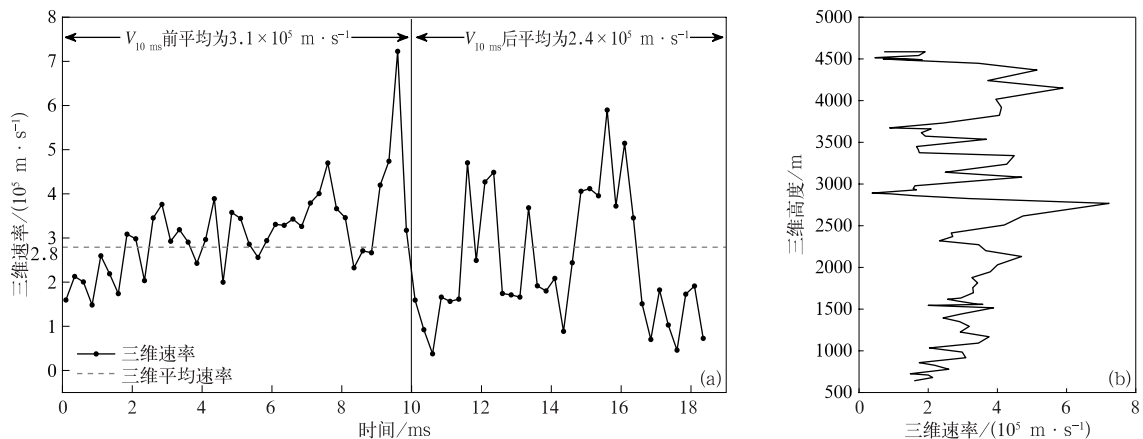


图6 FA19014先导三维速率随时间变化(a)以及随高度变化(b)

Fig. 6 3D speed changes with time(a) and with height(b) of FA19014

2.4 上行先导二维与三维发展特征差异成因

图7为三维速率、二维速率以及两者比值随时间变化(时间分辨率均为 $250 \mu\text{s}$)。三维速率与二维速率之比范围为 $1 \sim 4.7$,先导的平均三维速率是平均二维速率的1.5倍。由图7可知,在先导始发后约10 ms前,三维速率和二维速率呈相同的变化趋

势,此时速率比也稳定在 $1 \sim 2$ 。在先导起始约10 ms后,其二维速率较小且变化不明显,10 ms后二维速率的方差仅为10 ms前的48%,而三维速率呈明显波动,因此对应的三维速率与二维速率之比也呈明显的波动变化。

先导起始10 ms后三维速率与二维速率差异较

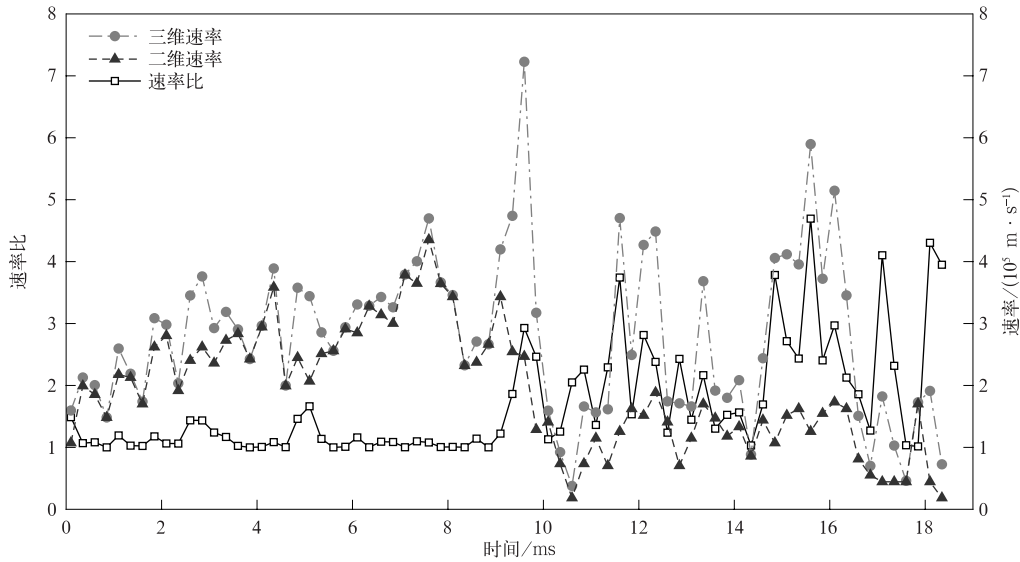


图 7 FA19014 先导三维速率与二维速率及三维速率与二维速率之比随时间变化

Fig. 7 3D speed, 2D speed and their ratio change with time of FA19014

大。对于广州塔上行闪电,在利用单站光学资料进行二维分析时,假设闪电通道在与观测视线垂直的广州塔所在的平面上(即闪电通道上任意一点到观测点的距离等于广州塔到观测点的距离 d_2),而实际上通道距观测点 1 的距离和在空间中发展方向均在变化。由此推出先导三维速率与二维速率之比的理论计算公式为

$$\frac{V_{3D}}{V_{2D}} = \frac{1}{d_2} \cdot \frac{d_1}{\sin\varphi} \quad (1)$$

式(1)中, d_1 , d_2 和 φ 分别表示三维通道段与观测点 1 的距离、广州塔与观测点 1 的距离以及三维通道段的发展方向与观测点 1 视线方向的夹角。

分析中每个资料对应先导 250 μs 分段内的平均结果,但计算理论值时采用重建通道段所有点三维坐标的算术平均值作为该段通道的特征点,以观测点 1 到特征点的距离为 d_1 ,连线方向作为视线方向,将三维通道段拟合成空间中的线段并计算其与视线方向之间的夹角 φ 。本研究个例分析结果如图 8a 所示,速率比实际值与理论值之间具有较强的相关性,相关系数为 0.7444(达到 0.001 显著性水平)。图 8b 为速率比实际值和理论值随时间变化,它们的变化有较好的一致性,且数值较为接近。速率比样本与理论值存在差异,是实际分析的先导通道发展方向不断变化、先导通道段存在弯曲造成的。理论上,如果所分析先导通道段不弯曲,或时间分辨率足够

精细,则该先导通道段为线段(即没有弯曲),则采用式(1)得到的三维速率与二维速率之比的理论值与实际完全相等。

本文在计算闪电通道的二维长度和速率等特征参数时,假定每段闪电通道均与观测点 1 的视线方向垂直,并以观测点 1 至广州塔的距离代替空间中闪电通道至观测点 1 的真实距离。而重建后得到的通道反映闪电在三维空间中的真实形态,实际每段通道在空间中的发展方向以及这段通道至观测点 1 的距离均不同,这是造成三维速率与二维速率差异的原因。图 8c 中灰色闪电三维通道对应速率比不规则波动的部分。通道到观测点 1 的距离(d_1)和与观测点 1 视线方向的夹角(φ)随时间的变化如图 8d 所示。可以看到在起始约 10 ms 内先导在高度升高的同时朝靠近观测点 1 的方向发展,约 10 ms 后发展的水平方向变为远离观测点 1,因此 d_1 在先导起始 10 ms 内变化很小,而约 10 ms 后快速增加。且在发展过程中通道发展方向与观测点 1 视线方向的夹角呈减小趋势。总体上,在先导起始约 10 ms 前, d_1 与 φ 的变化幅度较小,因此三维速率与二维速率差异较小。随着 10 ms 后先导水平发展方向的改变,闪电通道距观测点 1 的距离快速增加,同时发展方向与视线方向的夹角变化幅度较大,三维速率与二维速率之比呈波动趋势。注意到先导起始 10 ms 后 d_1 稳定增长的同时速率比大值处对应的 φ 很小,

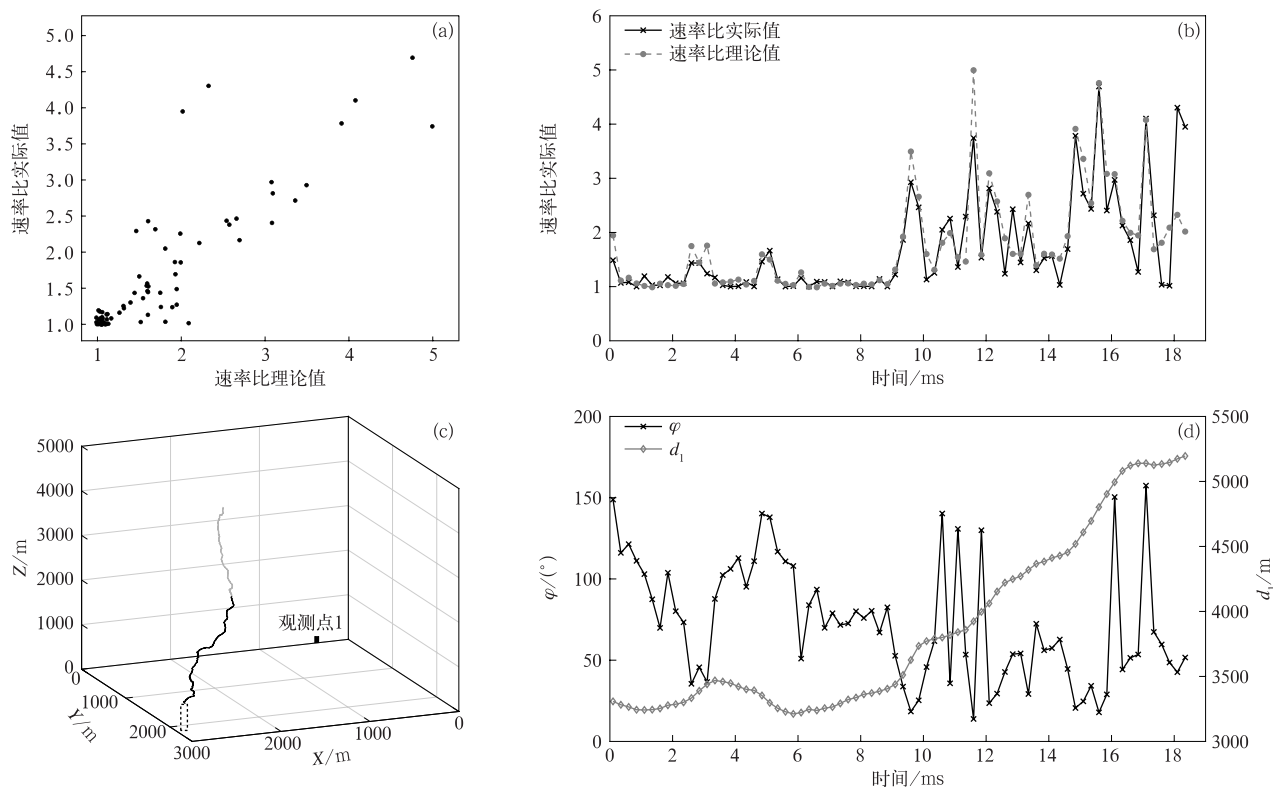


图8 三维速率和二维速率差异

- (a)三维速率和二维速率之比的实际值与理论值关系,(b)速率比实际值与理论值随时间变化,
(c)三维闪电通道与观测点1在空间中的位置对比(灰色通道表示该部分三维速率与二维速率差异较大),
(d) d_1 与 φ 随时间变化

Fig. 8 Differences in velocity between 3D and 2D

- (a)actual ratio of 3D speed and 2D speed versus theoretical values of ratio,
(b)changes of actual and theoretical ratio with time,(c)relative position of 3D reconstruction channel
and station-1 in space(grey channel denotes huge difference between 3D and 2D speed),
(d)changes of d_1 and φ with ime

认为通道发展方向与观测点1视线方向夹角的变化是造成短时间内三维速率与二维速率之比波动的主要原因。

3 结论与讨论

本文利用高速摄像和普通摄像的双站光学观测资料、同步电场变化和地闪定位资料,分析2019年4月20日05:12发生在广州塔上的一次由附近正地闪引发的触发型上行闪电,得到如下结论:

1)重建后三维通道的长度为5.4 km,是用于重建的二维通道长度的1.5倍,三维通道在垂直方向的发展高度超过4.6 km,水平方向发展约800 m。

2)二维速率随时间和高度均呈先缓慢增大、后快速减小的变化趋势。五点平滑后(时间分辨率为

$250 \mu\text{s}$)先导二维速率范围约为 $1.8 \times 10^4 \sim 4.5 \times 10^5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,平均值约为 $1.8 \times 10^5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。相同时间分辨率下,先导三维速率范围为 $3.8 \times 10^4 \sim 7.2 \times 10^5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,平均值约为 $2.8 \times 10^5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。在先导始发后10 ms内,三维速率与二维速率的变化趋势大致相同,与二维速率分析结果不同的是,10 ms后二维速率趋于稳定且普遍处于平均值以下,而三维速率随时间呈明显的不规则波动变化。

3)先导三维速率与二维速率之比范围为1~4.7(时间分辨率为 $250 \mu\text{s}$),平均值约为1.5。在先导始发后约10 ms内,速率比稳定于1~2,10 ms后速率比随时间呈不规则波动变化。三维速率与二维速率之比总体变化趋势取决于先导发展过程中通道至观测点的距离,而速率比在短时间内波动与通道发展方向和视线方向的夹角变化有关。

总体上,本文利用高时空分辨率的观测资料分析一次较为完整的上行闪电先导发展过程,得到较精细的分析结果。利用双站光学观测资料重建三维闪电通道,给出更接近真实闪电时空发展特性的三维发展特征并与二维发展特征进行对比,发现先导发展到一定阶段二者差异增大,更加证明了对闪电进行三维分析的重要性。但目前尚无法解释先导发展过程中速率快速下降(图6中10 ms附近)的原因,今后要进一步分析先导发展时广州塔上方雷暴云内的电荷分布特征,深入探讨影响先导发展特征的因素。

参考文献

- [1] Rakov V A, Uman M A. *Lightning: Physics and Effects*. New York: Cambridge University Press, 2003.
- [2] Eriksson A J. Lightning and tall structures. *Trans S Afr Inst Electr Eng*, 1978, 69(8): 238-253.
- [3] 马瑞阳, 郑栋, 姚雯, 等. 雷暴云特征数据集及我国雷暴活动特征. *应用气象学报*, 2021, 32(3): 358-369.
Ma R Y, Zheng D, Yao W, et al. Thunderstorm feature dataset and characteristics of thunderstorm activities in China. *J Appl Meteor Sci*, 2021, 32(3): 358-369.
- [4] 田野, 姚雯, 尹佳莉, 等. 不同闪电跃增算法在北京地区应用效果对比. *应用气象学报*, 2021, 32(2): 217-232.
Tian Y, Yao W, Yin J L, et al. Comparison of the performance of different lightning jump algorithms in Beijing. *J Appl Meteor Sci*, 2021, 32(2): 217-232.
- [5] Wang D, Takagi N, Watanabe T, et al. Observed characteristics of upward leaders that are initiated from a windmill and its lightning protection tower. *Geophys Res Lett*, 2008, 35(2): 196-199.
- [6] Lu W, Wang D, Zhang Y, et al. Two associated upward lightning flashes that produced opposite polarity electric field changes. *Geophys Res Lett*, 2009, 36(5): 277-291.
- [7] Wang Z, Qie X, Jiang R, et al. High-speed video observation of stepwise propagation of a natural upward positive leader. *J Geophys Res Atmos*, 2016, 121(24): 14307-14315.
- [8] Warner T A, Cummins K L, Orville R E. Upward lightning observations from towers in Rapid City, South Dakota and comparison with national lightning detection network data, 2004-2010. *J Geophys Res Atmos*, 2012, 117(D19). DOI: 10.1029/2012JD018346.
- [9] Saba M M, Schumann C, Warner T A, et al. Upward lightning flashes characteristics from high-speed videos. *J Geophys Res Atmos*, 2016, 121(14): 8493-8505.
- [10] Warner T A, Saba M, Rudge S, et al. Lightning-triggered Upward Lightning from Towers in Rapid City, South Dakota. *International Lightning Detection Conference*, 2012.
- [11] 雷艺楠, 谭涌波, 余骏皓, 等. 高矮建筑物多上行先导连接过程的数值模拟. *应用气象学报*, 2022, 33(1): 80-91.
Lei Y N, Tan Y B, Yu J H, et al. Numerical simulation on multiple upward leader attachment process of tall and low buildings. *J Appl Meteor Sci*, 2022, 33(1): 80-91.
- [12] Yuan S, Jiang R, Qie X S, et al. Characteristics of upward lightning on the Beijing 325 m meteorology tower and corresponding thunderstorm conditions: Upward lightning & thunderstorm. *J Geophys Res Atmos*, 2017, 122(22): 12093-12105.
- [13] Heidler F, Manhardt M, Stimpfer K. Upward positive lightning measured at the Peissenberg Tower, Germany. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2015, 57(1): 102-111.
- [14] Diendorfer G, Pichler H, Mair M. Some parameters of negative upward-initiated lightning to the Gaisberg Tower (2000-2007). *IEEE Trans Electromagn Compat*, 2009, 51(3): 443-452.
- [15] Shindo T, Tajima A, Motoyama H, et al. Meteorological conditions and occurrence of upward lightning at high structures. *IEEJ Transactions on Power and Energy*, 2015, 135(6): 417-418.
- [16] Schumann C, Saba M, Warner T, et al. On the triggering mechanisms of upward lightning. *Scientific Reports*, 2019, 9(1). DOI: 10.1038/s41598-019-46122-x.
- [17] Saba M, Paiva A, Concollato L C, et al. Optical observation of needles in upward lightning flashes. *Scientific Reports*, 2020, 10(1). DOI: 10.1038/s41598-020-74597-6.
- [18] Sunjerga A, Rubinstein M, Azadifar M, et al. Bidirectional recoil leaders in upward lightning flashes observed at the Sântis Tower. *J Geophys Res Atmos*, 2021, 126(18). DOI: 10.1029/2021JD035238.
- [19] Yuan S, Qie X, Jiang R, et al. In-cloud discharge of positive cloud-to-ground lightning and its influence on the initiation of tower-initiated upward lightning. *J Geophys Res Atmos*, 2021, 126(24). DOI: 10.1029/2021JD035600.
- [20] 王艺儒, 谭涌波, 郑天雪, 等. 利于上行负地闪始发的电荷区参数数值模拟. *应用气象学报*, 2020, 31(2): 175-184.
Wang Y R, Tan Y B, Zheng T X, et al. Numerical simulation of main negative charge area parameters for upward negative cloud-to-ground lightning. *J Appl Meteor Sci*, 2020, 31(2): 175-184.
- [21] 齐奇, 吕伟涛, 武斌, 等. 广州两座高建筑物上闪击距离的二维光学观测. *应用气象学报*, 2020, 31(2): 156-164.
Qi Q, Lü W T, Wu B, et al. Two-dimensional optical observation of striking distance of lightning flashes to two buildings in Guangzhou. *J Appl Meteor Sci*, 2020, 31(2): 156-164.
- [22] 武斌, 吕伟涛, 齐奇, 等. 双向先导正端突然延展现象的高速摄像观测. *应用气象学报*, 2020, 31(2): 146-155.
Wu B, Lü W T, Qi Q, et al. High-speed video observations on abrupt elongations of the positive end of bidirectional leader. *J Appl Meteor Sci*, 2020, 31(2): 146-155.
- [23] 李俊, 张义军, 吕伟涛, 等. 一次多回击自然闪电的高速摄像观

- 测. 应用气象学报, 2008, 19(4): 401-411.
- Li J, Zhang Y J, Lü W T, et al. Observation of a natural cloud-to-ground lightning with multiple return strokes. *J Appl Meteor Sci*, 2008, 19(4): 401-411.
- [24] Wu B, Lyu W T, Qi Q, et al. High-speed video observations of needles in a positive cloud-to-ground lightning flash. *Geophys Res Lett*, 2022, 49(2). DOI: 10.1029/2021GL096546.
- [25] Qi Q, Lyu W T, Wu B, et al. Two-dimensional striking distance of lightning flashes to a cluster of tall buildings in Guangzhou. *J Geophys Res Atmos*, 2021, 126(22). DOI: 10.1029/2021JD034613.
- [26] Berger K. Novel observations on lightning discharges; Results of research on Mount San Salvatore. *Journal of the Franklin Institute*, 1967, 283(6): 478-525.
- [27] Chang J S, Beuthe T G, Hu G G, et al. Thundercloud electric field measurement in the 553-m CN Tower during 1978—1983. *J Geophys Res Atmos*, 1985, 90(D4): 6087-6090.
- [28] Manhardt M, Heidler F, Stimper K. The Electric Field of Negative Upward Lightning Strikes at the Peissenberg Tower, Germany// International Conference on Lightning Protection, 2012.
- [29] Jiang R, Qie X, Wu Z, et al. Characteristics of upward lightning from a 325 m tall meteorology tower. *Atmos Res*, 2014, 149(6): 111-119.
- [30] Gorin B N. Measurements of lightning currents at the Ostanino tower. *Elektrich*, 1984, 8: 64-65.
- [31] Suzuki T. Long term observation of winter lightning on Japan Sea Coast. *Res Lett Atmos Electr*, 1992, 12: 53-56.
- [32] Lu W T, Gao Y, Qi Q, et al. Three-dimensional propagation characteristics of the leaders in the attachment process of a downward negative lightning flash. *J Atmos Sol Terr Phys*, 2015, 136: 23-30.
- [33] Qi Q, Lu W T, Wu B, et al. Three-dimensional optical observations of an upward lightning triggered by positive cloud-to-ground lightning. *Atmos Res*, 2018, 214: 275-283.
- [34] Markus H. 3D Reconstruction and Geographical Referencing of Lightning Discharges. Graz; Graz University of Technology, 2008: 1-120.
- [35] Liu Y C. A Feasibility Study on the Three-dimensional Reconstruction of High Voltage and Lightning Discharge Channels Using Digital Images. Johannesburg; University of the Witwatersrand, 2012: 1-169.
- [36] Gao Y, Lu W T, Ma Y, et al. Three-dimensional propagation characteristics of the upward connecting leaders in six negative tall-object flashes in Guangzhou. *Atmos Res*, 2014, 149: 193-203.
- [37] 王智敏, 吕伟涛, 陈绿文, 等. 2011—2012年广州高建筑物雷电磁场特征统计. 应用气象学报, 2015, 26(1): 87-94.
- Wang Z M, Lü W T, Chen L W, et al. Statistical characteristics of magnetic field produced by tall-object lightning in Guangzhou during 2011—2012. *J Appl Meteor Sci*, 2015, 26(1): 87-94.
- [38] 张义军, 吕伟涛, 陈绍东, 等. 广东野外雷电综合观测试验十年进展. 气象学报, 2016, 74(5): 655-671.
- Zhang Y J, Lü W T, Chen S D, et al. A review of lightning observation experiments during the last ten years in Guangdong. *Acta Meteor Sinica*, 2016, 74(5): 655-671.
- [39] 吕伟涛, 陈绿文, 马颖, 等. 广州高建筑物雷电观测与研究10年进展. 应用气象学报, 2020, 31(2): 129-145.
- Lü W T, Chen L W, Ma Y, et al. Advances of observation and study on tall-object lightning in Guangzhou over the last decade. *J Appl Meteor Sci*, 2020, 31(2): 129-145.
- [40] 吕伟涛, 张阳, 马颖, 等. 全视野闪电事件观测系统及方法. 发明专利, 2013: 2011100662855.
- Lü W T, Zhang Y, Ma Y, et al. Total-sky Lightning Channel Imager and Method. Patent, 2013: 2011100662855.
- [41] Lü W T, Ma Y, Zhang Y, et al. Total-sky Lightning Event Observation System and Method. US Patent, 2014: US 8902312 B2.
- [42] Shi D, Zheng D, Zhang Y, et al. Low-frequency E-field Detection Array(LFEDA)—Construction and preliminary results. *Sci China Earth Sci*, 2017, 60(10): 1896-1908.
- [43] 陈绿文, 吕伟涛, 张义军, 等. 粤港澳闪电定位系统对高建筑物雷电的探测. 应用气象学报, 2020, 31(2): 165-174.
- Chen L W, Lü W T, Zhang Y J, et al. Detection results of Guangdong-Hongkong-Macao lightning location system for tall-object lightning. *J Appl Meteor Sci*, 2020, 31(2): 165-174.
- [44] 张悦, 吕伟涛, 陈绿文, 等. 基于人工引雷的粤港澳闪电定位系统探测性能评估. 应用气象学报, 2022, 33(3): 329-340.
- Zhang Y, Lü W T, Chen L W, et al. Evaluation of GHMLLS performance characteristics based on observations of artificially triggered lightning. *J Appl Meteor Sci*, 2022, 33(3): 329-340.
- [45] 武斌, 吕伟涛, 齐奇, 等. 一次正地闪触发两个并发上行闪电的光电观测. 应用气象学报, 2019, 30(3): 257-266.
- Wu B, Lü W T, Qi Q, et al. Optical and electric field observations of two concurrent upward flashes triggered by a positive cloud-to-ground flash. *J Appl Meteor Sci*, 2019, 30(3): 257-266.
- [46] 高彦. 闪电连接过程中先导三维发展特征的分析. 北京: 中国气象科学研究院, 2014.
- Gao Y. The Three-dimensional Propagation Characteristics of Flash Leaders in the Attachment Process. Beijing; Chinese Academy of Meteorological Sciences, 2014.

Difference Between 2D and 3D Development Characteristics of an Upward Lightning Leader

Guan Yunong¹⁾²⁾ Lü Weitao²⁾ Qi Qi²⁾ Wu Bin²⁾³⁾ Ma Ying²⁾

Chen Lüwen⁴⁾ Liu Hengyi²⁾ Zhang Yijun¹⁾

¹⁾ (*Department of Atmospheric and Oceanic Sciences & Institute of Atmospheric Sciences, Fudan University, Shanghai 200438*)

²⁾ (*State Key Laboratory of Severe Weather & CMA Key Laboratory of Lightning, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081*)

³⁾ (*CMA Research Center on Meteorological Observation Engineering Technology, Beijing 100081*)

⁴⁾ (*Guangzhou Institute of Tropical and Marine Meteorology, CMA, Guangzhou 510641*)

Abstract

Tall object not only has a high probability of being struck by downward lightning, but also is easy to trigger upward lightning. Comparing with 2D optical observation, reconstructed 3D observation by dual-station optical observation can better reflect the real characteristics of the lightning channel. Based on the synchronous dual-station optical observations from the Tall-Object Lightning Observatory in Guangzhou (TOLOG), an upward lightning triggered by a nearby positive cloud-to-ground (CG) flash at Guangzhou Tower is investigated, and 2D and 3D development characteristics of the upward leader are compared.

The result shows that the length of 3D channel is 5.4 km, which is 1.5 times of 2D channel. 3D channel is developed at a height of more than 4.6 km in the vertical direction and about 800 m in the horizontal direction. 2D speed ranges from 1.8×10^4 to 4.5×10^5 m \cdot s⁻¹, with an average of 1.8×10^5 m \cdot s⁻¹. 3D speed ranges from 3.8×10^4 to 7.2×10^5 m \cdot s⁻¹, with an average value of 2.8×10^5 m \cdot s⁻¹. Within 10 ms after the leader initiation, 3D and 2D speeds show roughly the same trend. After 10 ms, 2D rate decreases significantly and changes little over time, while 3D speed shows an obvious irregular fluctuation with time. The ratio of 3D speed and 2D speed ranges from 1 to 4.7, with an average of 1.5. The ratio remains stable at 1–2 for the first 10 ms after leader initiation and then shows irregular fluctuations with time. In fact, due to the change of horizontal development direction of the channel 10 ms after the leader initiation, the distance between the channel and the station-1 increases rapidly, leading to increasing speed difference between 3D and 2D observations. The cause for the fluctuation of 3D speed and 2D speed ratio is that the angle between the development direction of the channel and the sight direction of the observation station changes greatly. The results of 2D and 3D vary greatly at a certain stage of upward leader development, which further proves the importance of analyzing 3D development characteristics of lightning.

Key words: upward flash; dual-station optical observation; 3D reconstruction of channel; 3D development characteristics; difference in characteristics