

闪电双向先导理论及观测：极性不对称、不稳定及间歇性*

苟学强^{1)†} 张义军²⁾ 李亚珺³⁾ 陈明理⁴⁾

1) (西北师范大学物理与电子工程学院, 兰州 730070)

2) (复旦大学大气与海洋科学系大气科学研究院, 上海 200438)

3) (中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 兰州 730000)

4) (香港理工大学屋宇设备工程学系, 香港)

(2018年6月1日收到; 2018年7月24日收到修改稿)

闪电双向先导原理的提出及观测验证是闪电物理研究近几十年最重要的进展之一, 而正、负先导及流光的极性不对称性及传输的持续、间歇性, 是理解闪电各种过程物理机制的关键. 本文对闪电双向先导的概念及进展进行了总结和讨论, 重点强调了正、负先导流光传输机制特别是门限电场的不对称性, 阐述了正先导传输的连续性及其在闪电始发、负先导的空间先导形成、不稳定先导通道中的反冲先导建立等过程中独特的启动作用.

关键词: 闪电, 双向先导, 极性不对称, 间歇性

PACS: 52.80.Mg, 92.60.Pw

DOI: 10.7498/aps.67.20181079

1 引言

闪电的放电本质, 早在两百多年前已被知晓, 然而, 直到进入20世纪, 特别是近一二十年, 随着闪电探测技术的发展, 大量声、光、电磁及高能现象的揭示, 对闪电的物理本质的认识才有了新的飞跃, 其中一个重要方面就是关于闪电起始的双向导原理的提出与发展. 早期对闪电放电机制的解释, 大多基于Schonland^[1]提出的源电荷模式(the source charge model), 此模型可视为实验室长间隙放电机制的外推, 其中雷云电荷堆及地面分别类似于实验室放电中的棒、板电极, 放电起始于云电荷堆(云电极), 放电通道呈均一电荷分布且单向发展. 实际上, 由于存储电荷的云雾大气并不比纯净大气更易导电, 闪电放电并没有类似的导

体电极, 其起始必然首先是局部(小尺度)击穿并形成初始等离子体导电通道(闪电种子或闪电核). Kasemir^[2]根据基本的静电原理, 提出闪电双向先导(bidirectional leader)原理, 即闪电通道可视为雷云强电场中的导体, 静电感应的结果, 在导体两端产生电荷集中和电场增强, 当电场增强到一定程度时, 便产生电击穿, 极性相反的通道(正、负电极)从雷云电场汲取能量并反向发展, 而整个通道为电中性并基本保持均一电势.

Mazur^[3,4]在飞行器实验中首次发现飞机并不是被闪电击中, 而是飞机自身触发了闪电; 此后, 对强电场下悬挂导体实验^[5]及人工触发闪电实验^[6]进一步验证了双向先导理论, 并发现正、负先导的始发并不同步(门限较高的负先导存在明显延迟). 闪电甚高频(very high frequency, VHF)辐射

* 国家自然科学基金重大研究计划(批准号: 91537209)和香港特别行政区研究拨款委员会(批准号: PolyU152139/15E)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: gxq411@126.com

源定位 (lightning mapping array, LMA) 技术则显示闪电云内双向先导过程具有极其丰富的结构, 并揭示出自然闪电具有不同于常规 (实验室长间隙双向先导) 放电的重要特征: 极性不对称性^[7], 例如正先导击穿的辐射功率比负先导至少低一个量级^[8,9], 从而更难以观测. 近年来, 高速 (微秒及亚微秒时间分辨率) 摄 (照) 像和光电阵列等光学观测手段的应用, 为自然闪电中双向先导提供了直接证据^[10,11], 同时揭示出包括闪电始发^[12]、梯级及箭式梯级先导^[13-15]、反冲先导^[16-18]及连接过程^[19,20]中的双向机制的存在. 而最近宽带干涉高频LMA的改进及应用^[21,22], 可望在云内闪电双向先导, 特别是正先导及反冲先导的研究上取得新的进展. 值得一提的是, 有关闪电双向先导研究, 特别是观测研究方面, 中国学者做出了许多出色的工作^[6,15,18,23-31].

基于双向先导的闪电模拟研究, 可对云、地闪电的始发和传输^[32], 各种类型闪电的形成与雷云电荷结构的关系^[33], 闪电在雷雨云中逃逸^[34-36], 如向下逃逸成为正负地闪及晴天霹雳 (bolts from the blue) 和向上逃逸成为蓝色喷流 (blue jet) 及巨大喷流 (gigantic jet) 等提供一种统一解释. 双向先导理论从提出之时的一度遭冷落, 到近50年后被普遍接受, 经过了一番曲折. 双向先导理论为闪电各种过程的物理机制解释, 包括闪电在低雷云环境电场中的始发、负先导梯级性的形成、不稳定先导通道中二次脉冲 (反冲先导) 的产生, 都提供了比较简单、可靠且统一的机制^[37-40]. 当然, 双向先导理论远未完善, 随着研究的深入, 先导过程更加复杂和深层的特征, 如闪电放电时空特征的复杂性 (分形性) 及间歇性被揭示出来^[41-44], 而双向先导的极性不对称性、先导通道不稳定性、负先导的梯级间歇性及正先导的先导重燃 (restrike) 现象, 仍是闪电物理研究的焦点. 本文根据新近的进展, 对相关问题进行了总结和讨论.

2 先导的极性不对称性: 连续及间歇

从根本上说, 先导 (无论正、负) 的产生及发展, 是与其前部的大量流光电子雪崩系统相互依赖、相互作用的结果^[39,45,46]. 一方面, 先导的发展总是以其前部大量刷状流光 (脉冲电晕: pulsed corona) 的始发为引导, 流光通过不断汲取前部强电场区

域 (大于击穿电场 E_{break}) 的电子雪崩电离形成弱电离通道, 并用以储存电荷和能量; 相应于流光前部的击穿电场, 流光通道中也存在支持流光传输的最小门限电场 E_{stable} , 流光发展中某种内在的不稳定^[39], 将形成流光电流及其电热的聚焦效应 (先导核), 并将冷的、弱导电的、弥散且不稳定的流光电晕转化为比较热的、高导电的、细且较稳定的先导通道. 另一方面, 先导通道则通过其后不断刷新的导电性, 以较小的通道电场, 来维持头部区域电荷和电场的集中及新流光的稳定始发. 同时, 无论实验室长间隙放电还是闪电放电, 无论始发门限、传输行为等具有明显差异, 都发现正、负先导流光, 具有极性不对称性^[7,40,47]. 图1为2012年4月12日在美国科罗拉多州的LMA系统 (Colorado lightning mapping array, COLMA)^[48]观测到的一次反极性云闪 (上部负电荷区和下部正电荷区之间的放电) 的VHF定位辐射源图, 图中正、负号分别表示正、负电荷区, 红色为向上发展的正先导 (主要通过反冲先导揭示), 蓝色为向下发展的负先导, 反映出正负先导有明显的行为差异, 如分叉、间歇性等. 正负先导的不对称性根本上来自于流光过程中正负离子和电子迁移性的较大差异, 而后者比前者约大两个量级^[49]. 正、负流光的传播基本上表现为高迁移性的电子运动, 对正先导而言, 是电子收敛于流光头部的强电场区, 是容易的方向 (绿灯效应); 而对负先导而言, 是电子发散于远离流光头部的弱电场区, 是不易的方向 (红灯效应), 从而导致正流光更容易始发和持续传输^[40] (图2). 一般认为, 正先导往往发展较慢, 具有连续性且有大而稀疏的分叉, 产生较小的电流及较弱的VHF辐射, 而负先导发展较快, 具有梯级间歇性且有小而频繁的分叉, 产生较大的电流等, 然而这些似乎都不是绝对的^[7,50]. 使闪电双向先导极性不对称变得更加突出的可能是正极性过程的连续性和负极性过程的间歇性.

自然闪电放电不同于实验室长间隙放电的最明显也是最重要的特征就是其多脉冲 (间歇) 性. 如负地闪中电荷一般并不是在高导电通道中一次性释放, 而是被一系列比较长时间的黯淡间歇所分隔, 与此形成对照的是正地闪过程的明显的持续性 (一次性). 同时, 在多闪击负地闪中, 云内的正先导过程又表现出某种持续性, 当通道下端衰减电

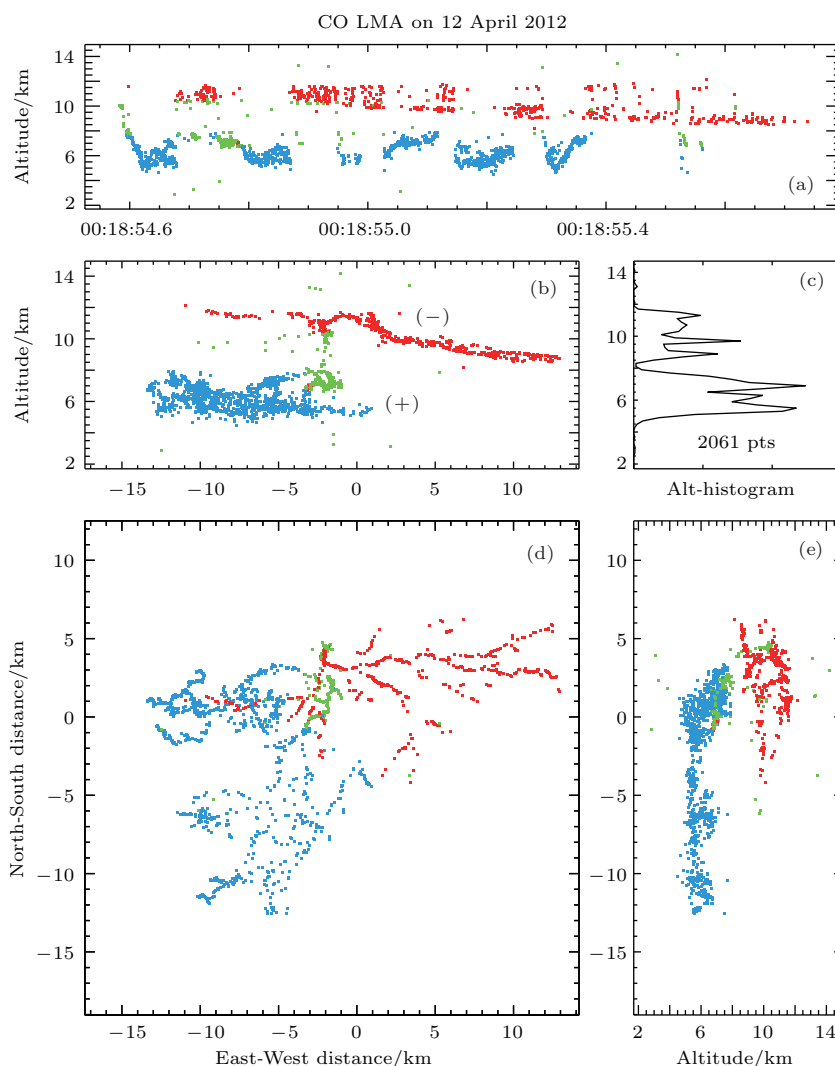


图1 2012年4月12日在美国科罗拉多州的LMA系统(COLMA)观测到的一次反极性云闪双向先导 (a) 辐射源高度随时间的变化; (b) 东西方向立面上的投影; (c) 辐射源数目的高度分布; (d) 平面上的投影; (e) 南北方向立面上的投影 (红色表示正先导, 蓝色表示负先导)

Fig. 1. A bidirectional development of an inverted intra-cloud lightning discharge observed by COLMA system on April 12, 2012 : (a) Height-time view; (b) height-distance (from west to east) view; (c) source-height distribution; (d) plan view; (e) distance-height (from south to north) view (the positive leader is colored red and negative leader colored blue).

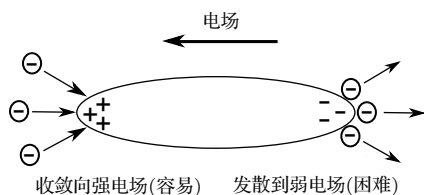


图2 先导极性不对称示意图

Fig. 2. Cartoon illustrating the polar asymmetry for a leader channel in an electric field.

流减小并截止时, 通道上端比较活跃(连续)的正先导, 则在上端间歇性地产生着箭式或箭式-梯级负先导的条件, 并让已衰减的放电通道得以一次次刷新, 以激活业已衰减的旧负先导通道, 启动新一

轮的放电. 类似的情况在云闪过程也同样发生, 即正先导的活跃和负先导的较长时间停顿形成了明显的对照 [7,21,51]. 在云闪中, 类似于箭式先导过程的是云中K过程, 或者反冲先导(recoil leader), 观测发现K过程总是产生于正先导端或者正极性击穿区域. 图3为2012年6月8日的一次正极性(上部正电荷区和下部负电荷区之间的放电)云闪过程COLMA [48]VHF的LMA图, 可以看出负先导过程的明显的间歇性以及起始于正先导端的脉冲性反冲先导(图中绿色). 这种连续与间歇的极性不对称性, 可能是闪电间歇性本质的重要因素.

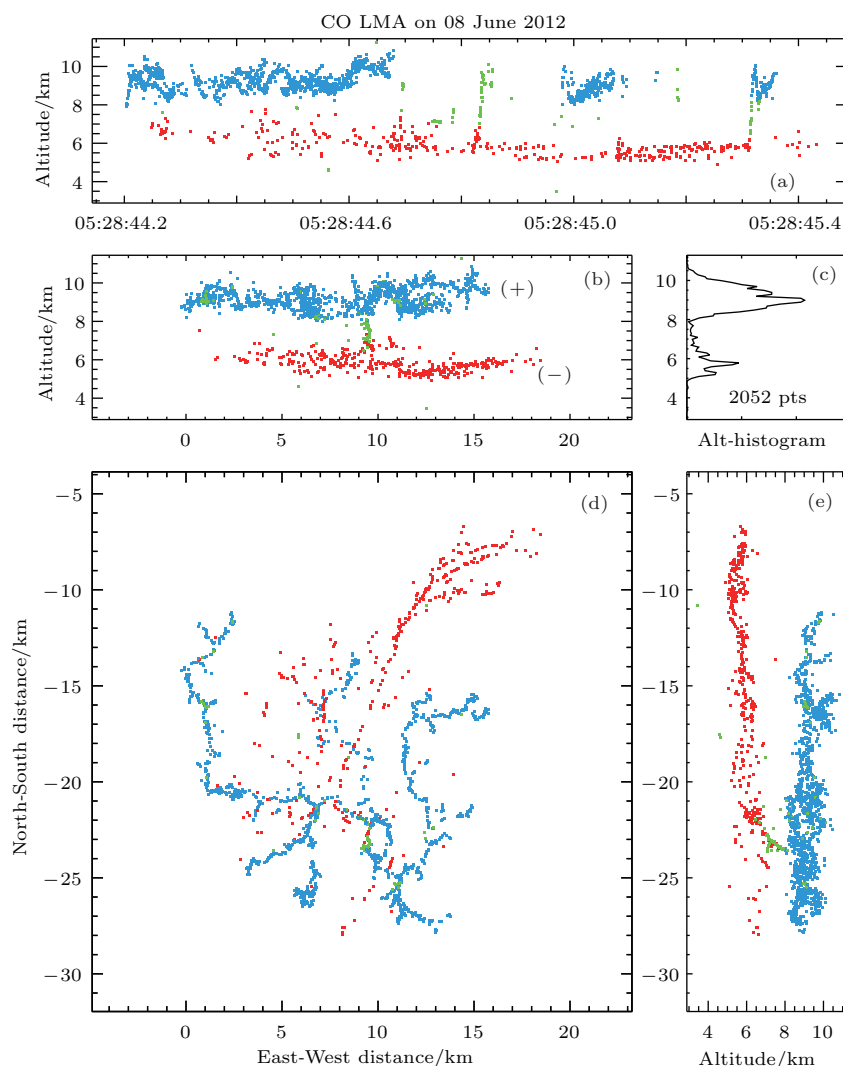


图3 2012年6月8日一次正极性云闪双向先导的COLMA定位(其他说明同图1)

Fig. 3. A bidirectional development of an intra-cloud lightning discharge observed by COLMA system on June 8, 2012 (Same as Fig. 1 for other illustration).

3 正先导的连续、间歇性

稳定连续性被认为是正先导传输的基本特征,正先导每一步的发展都足以在其头部产生下一步先导的条件^[52],如足够强的流光电晕、电流及相应的热效应,且在电晕始发、先导核形成及电流加热之间存在比较精准的调节;同时存在正先导稳定(连续)传输的阈值条件,如先导头部最小电势差^[38,39],流光区域最小电荷^[52],先导核最低温度^[53]等,而这些稳定条件的产生又依赖于一定的放电环境,如较高的先导电压、较大的电压上升率及较小的空气湿度等.当这些稳定条件不满足时,则意味着正先导的失稳及随后的先导重激发(restrike),表现为先导通道突然发亮及伸长和强烈

的电晕爆发^[54-57].但在实验室长间隙放电条件下,正先导连续性似乎仍然是主要的,而间歇、梯级性只是一种例外.

其实,即使稳定(连续)的正先导,如果增大时空分辨率,也会呈现比较规则(短)的间歇(跳跃)性^[39,58],而不是持续行进.间歇性的存在是由于新产生流光需要时间对通道进行收缩及加热.收缩和加热的主要机制是所谓的热电离不稳定性^[59](ionization-thermal instability),即轴向上电子数密度扰动导致的一种正反馈过程:电流增加→焦耳热增加→通道膨胀→压强减小→折合电场减小→碰撞电离加强→导电性和电流进一步上升.随着温度的上升,通道中的电子产生机制由碰撞电离变为缔合解离,产生流光到先导的突然转变^[39,46,58,60],热电离不稳定性可能是先导通道进

一步加热及导电性增强的重要机制. 虽然如此, 在实验室长间隙放电条件下, 正先导在某种程度(小尺度)或某些条件(失稳)下呈现某种梯级、间歇性, 但连续性是主要的, 而梯级性可能只是一种补充.

近十几年来, 关于闪电正先导梯级性的讨论增多, 如早期人工触发闪电中火箭上升阶段的间歇性电流脉冲^[61]、近年来人工触发闪电中向上正先导的发光及电流脉冲^[24]、自然闪电向下正先导中类似负先导的梯级光脉冲^[62]及正先导过程中的电磁脉冲^[25]、正先导击穿高频辐射脉冲^[26]、高塔上自持正先导的梯级性^[13]等. 闪电正先导过程的脉冲、间歇性的观测, 似乎揭示出闪电过程可能不同于实验室条件下(连续性为主)正先导传输模式的存在. 从另一方面来讲, 脉冲、间歇性不一定就等同于梯级性, 因为梯级性首先意味着先导通道的突然(比较大)伸长^[63], 如果只是正先导流光的重新始发, 则并不意味着此后的梯级性. 目前, 在正先导机制研究中, 关于间歇性、梯级性相联系的正先导空间茎(stem)的引发及转化机制的研究仍然缺乏, 但有理由认为, 类似于负先导的梯级性, 具有梯级性正先导的空间先导核必然远离先导头部, 这样才可能有先导的突然伸长, 且此先导的重新始发必然与流光通道中某种不稳定相联系. 除了前述热电离的不稳定性, 可能还有另一个重要的不稳定性: 即附着不稳定性(attachment instability)^[64], 此种不稳定性将加剧流光通道中电特性的不均匀, 将通道分成高电场、低导电性和低电场、高导电性相间的珠链(bead)结构, 并可能引发新的(二次)击穿^[65,66]. Rison等^[12]通过改进的连续宽带干涉VHF辐射源定位观测^[21]发现, 窄双极脉冲(narrow bipolar pulse, NBP)正是起始于闪电初始快速(约 10^7 m/s)正(流光)击穿过程. 由于这种快速正流光事件在包括云闪、地闪、晴空霹雳及高空闪电中都存在, 故推测所有闪电都由快速正流光引发, 并推测流光通道中的某种不稳定将快的正流光转化为慢的正先导, 并进一步转化为具有负先导的双向导, 这给长期悬而未决的关于闪电始发的正流光理论^[67]以有力的观测支持. Stock等^[22]也报道了宽带干涉定位观测由云闪K变化(反冲先导)及地闪回击过程的强电位波始发的快速正流光过程, 并注意到这些正流光过程(包括开始的NBP)与闪电精灵(sprite)正击穿过程完全类似. Luque

等^[66]研究了闪电精灵中的珠链结构, 并把它的产生与附着不稳定性相联系. Zhang等^[26]通过对人工触发闪电的宽带干涉定位观测, 发现始发于先导前部区域的类似于云闪中K变化的反冲过程. 闪电过程中, 最令人费解也最重要的应该就是与前述多过程相联系的二次击穿的产生, 如云闪中大量的K过程、负地闪中的多回击过程, 而这些过程的始发基本上与正先导击穿相联系. 因此, 我们有理由相信, 闪电过程中的快速正击穿流光可能类似于正先导起始阶段及不稳定传输阶段重新始发的正流光电晕, 而这些正流光中的某种不稳定(如附着不稳定)及由此形成的先导前部流光区域的不均匀性所导致的二次击穿可能正是正先导某种间歇、梯级性的重要机制. 当双向先导的负先导通道部分衰退以至于停止时, 相应的正先导通道中相对容易的正流光过程, 不仅通过未电离空气中的快速击穿, 随时恢复(启动)失稳的正先导, 而且不时通过已部分电离通道中的某种不稳定(热电离不稳定)引发反冲击穿(反冲先导), 呈现一种时间和空间上不规则的间歇. 主要由于击穿门限的差异, 正先导所谓的间歇性(甚至梯级性)可能只是正先导传输中的某种暂时的失稳和重新始发, 而正先导流光的连续性则是主要的, 并决定着整个闪电放电过程.

4 负先导的梯级性、间歇性

与正先导的连续性形成鲜明对照的是负先导的梯级性、间歇性. 早在20世纪30年代, Schonland等^[68]就通过条纹相机发现, 负先导传输表现为一系列短暂(约微秒量级)发亮的阶梯逐级伸向地面, 一次梯级使先导跳跃约几十到上百米(梯级长度), 连续两次跳跃之间是较长时间(约几十微秒)黯淡的暂停间歇(梯级间歇). 然而, 对负先导梯级性机制的研究进展, 则基本上依赖于此后实验室长空气间隙放电实验, 比较重要的如Gorin等^[69], Les Renardieres Group^[70]及最近Kochkin等^[71]关于负先导梯级始发的前驱机制的观测, 即明亮梯级过程并不是始发于暂止的先导头部区域, 而是在远离先导头部的脉冲电晕区(约一个梯级长度)处出现(多处)不均匀且孤立的斑点或空间茎. 空间茎两端出现极性相反的电晕, 并转变为双向发展的空间先导, 其中反向发展的正先导与原首先导头部迅速接近, 电场迅速增强, 当完成最后一跳时, 产生类似

小回击的较强的梯级电流和明亮脉冲, 并伴随包括 X 射线之内的高能级高频辐射. 梯级脉冲呈双向传输, 向后使较长的通道发亮, 向前则使先导伸长一个梯级长度, 之后并不停止, 而是马上始发下一次的脉冲电晕(图 4). 闪电的光电阵列观测 [72,73] 及高速摄像观测 [74] 证实了闪电负先导梯级脉冲的双向传输. 关于闪电中类似于实验室长间隙梯级先导空间先导机制的直接证据, 基本上都来自于近年来人工及自然闪电高速摄像观测 [13,74,75]. 这些观测同时发现了流光区域中多个(串状或并列)空间茎及先导的存在, 揭示出梯级过程的弯曲及分叉机制 [15,27,28]. 然而, 由于问题的复杂性, 负先导梯级性机制和空间茎的产生等一些关键问题仍远未清楚. 传统的观点认为, 空间茎是源于电晕通道远端正负离子弛豫过程产生的空间电荷效应 [45], 而最近关于实验室负先导的光学高分辨观测 [71] 则发现, 空间茎是产生于负流光区域中的普遍存在的珠状 (bead) 结构. 可以说, 对自持传输的负先导而言, 这些珠状结构可能是其常态, 且珠状结构与原先导头部之间的强场区, 不仅使产生连接的正流光容易始发, 而且也更容易传输 (绿灯效应). 最近, Kostinskiy 等 [57] 报道了梯级正先导过程中可能的空间珠状结构, 但目前对这种正先导中的珠状结构的研究仍非常有限. 尽管如此, 我们仍有理由相信, 在失稳 (如强电位波或分叉等产生的屏蔽效应) 条件下, 大量容易始发和传输的正流光的存在及其产生的空间电荷效应, 也会在正流光区产生珠状

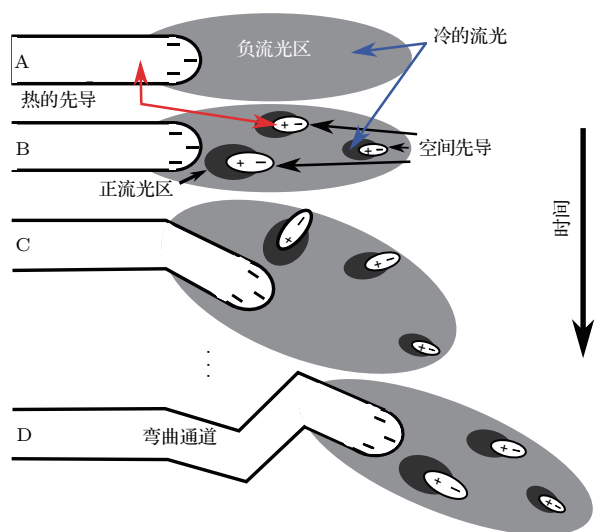


图 4 负先导梯级性机制卡通图 (修改自 Lapierre [76])
 Fig. 4. Cartoon illustrating the negative leader stepping process (Adapted from Lapierre [76]).

结构. 但对于正先导而言, 即使珠状结构在其前端正流光区中存在, 也可能使向后 (朝向正先导头部) 的连接负流光由于门限较高而难以产生, 而较容易产生的正流光由于向前进入弱电场区 (红灯效应) 而往往不能持续, 从而使反冲性的正先导梯级性过程更难产生. 但这种弱的向前的正流光的存在迟早会启动产生反向的连接负流光, 从而产生正先导的梯级间歇性 (重激发).

负先导的梯级性机制无疑是闪电先导研究中最困难的问题之一 [77], 然而从先导形成的角度来看, 较长 (上百米) 的先导通道特征并无明显的极性差异 [58], 这使得先导是梯级还是连续发展显得不那么重要, 而重要的是负先导自持传输 (稳定性) 条件. 根据 Bazelyan 等 [58] 的研究, 决定正负先导自持传输的是所谓电势差条件, 即先导始发及传输是由先导头部相对于未扰动背景电势差所控制的, 当这种电势差达到一定阈值时, 先导才可始发并持续传输. 为使先导持续传输, 先导头部电势差至少不应随先导的行进而减少, 这就要求先导通道电场必须小于背景电场. 由于先导通道的负微分电阻特性, 即通道两端电压 (也即通道内纵向电场) 与通道内电流成反比, 电流与先导传输速度成正比, 而先导速度又与先导头部电势差的平方根成正比, 这就反过来要求通道必须满足一定的持续行进的电势差阈值条件. Lalande 等 [61] (同时见 Mazur [38]) 对先导头部电势差进行了更加详细的阐述 (图 5), 图中 H, L, L_C 分别代表始发先导的建筑物高度、先导及前部电晕通道的长度, a_{ce} 为通道半径. 考虑先导电晕鞘电荷及头部电晕电荷 (电荷线密度为 q_{ce}) 的“屏蔽”作用对先导头部电势差 $\Delta\Phi_T$ 的修正: 由于负先导通道电荷线密度通常约是正先导的两倍, 从而对先导的抑制作用更加明显, 而且负先导稳定传输所需要的背景电场也大约是正先导的两倍, 这就解释了正负先导始发及传输所需背景电场门限的差异. 虽然如此, 相比于大量关于正先导连续性以及负先导梯级机制的讨论而言, 关于负先导持续性的讨论仍非常有限. 但有理由相信, 与正先导相比, 负先导 (流光) 更不容易始发和持续传输, 负先导的始发和重新始发、传输的每一步 (每个梯级) 都离不开正先导的引导和辅助, 这可能构成了负先导过程真正的梯级性和间歇性, 而持续性可能只是一种补充.

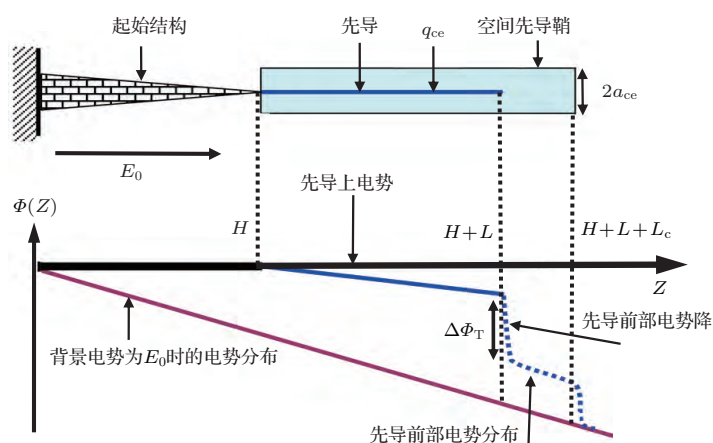


图5 地面物体上正先导的纵向电势分布 (改编自 Mazur [38])

Fig. 5. Longitudinal potential distribution along the path of an upward positive leader developing from a ground structure (Adapted from Mazur [38]).

5 反冲先导:通道不稳定性及转变

闪电先导过程最不同于实验室长间隙放电的可能莫过于反冲先导了. 早期的研究中, 反冲先导一般被称为K变化, 或反冲流光, 指发生在闪电(地闪或云闪J连接过程)中类似于小回击的电场脉冲过程, 并认为其产生是云中延伸的先导与新的极性相反的电荷堆的相遇, 这当然是与无导体电极的双向导概念不相容的. 长期以来, 反冲先导被认为是负极性的, 即从通道正先导端反向输送负电荷至负先导端, 而Williams和Heckman [47]则认为反冲先导其实也是双向发展的, 是又一个双向先导中的小双向(先导), 这一点也被高速摄像等光学观测所证实 [17,79]. 大量观测表明, 反冲先导的始发总是位于负电势阱区的正先导端, 这也成为闪电研究中最困难和令人困惑的问题. 目前关于闪电先导的模拟中并未包括反冲先导过程, 对反冲先导产生机制也没有比较清晰且被普遍接受的解释, 其中比较一致的看法是反冲先导源于双向先导传输中的某种不稳定所引发的通道电流截止(cutoff). Heckman [79]认为, 云中不断伸展的正先导端可作为一种电流源, 且当此电流超过一定门限时, 通道才保持稳定, 而当此电流低于门限时, 通道的负微分电阻特性引发的不稳定, 使(负先导)一端通道电流截止, 而另一端(正先导端)产生电荷累积, 并引发新的击穿. Mazur和Runke [38,80]认为Heckman [79]理论中把闪电通道等效为电弧电阻与电容的并联并不正确, 但即使Heckman的理论正确, 也可能只

适合于单极性(一端接地或一端电流已截止的情形) [51,80]. 文献 [40, 47]进一步强调了双向先导中传输速度的极性不对称: 负先导具有更大的速度和电流, 从而更容易使通道保持稳定, 而正先导由于速度和电流较小, 从而容易引发通道不稳定和反冲击穿. 这里也存在问题: 首先, 由于通道发展速度决定于通道头部相对于背景云电势的电势差, 先导速度可能更多地决定于云背景电势, 特别是先导头部所在背景电势阱的深度, 而不是先导的极性; 其次, 如果先导的速度呈现极性不对称, 那么由于先导通道电势为通道所在云背景电势的平均值 [39], 通道电势将向发展较快的一侧偏移 [7], 这样所谓负先导的速度和电流较大可能就不是绝对的. Mazur和Ruhnke [80]及Mazur [38]则强调了双向先导中另一种极性不对称: 分叉不对称. 认为先导通道的分叉及其屏蔽效应, 使通道电场减小, 电流截止并产生电荷积累, 引发反冲击穿, 由于负先导分叉小而频繁, 分叉间距短, 而正先导分叉分支大而稀疏, 分叉间距长, 因此后者更有利于反冲先导的产生, 但此假设无论从理论还是观测方面的研究仍非常有限.

根据上述讨论, 反冲先导应该产生于与先导通道负微分电阻特性相关的通道不稳定. 但这种不稳定应该不是一种先导通道的常态, 而可能意味着两种状态——导体态和半绝缘态的突然转化 [81], 而且这种转变可能与两个不同的门限电势差相联系(图6). 当先导通道两端的电势差增大到一定程度(U_2)时, 以反冲先导的出现为标志, 通道由半绝缘

态突变到大电流的导体状态(上部),此时通道可能表现出比较稳定的非负微分电阻特性,而当先导通道两端电压降到一定低限(U_1)时,通道变得不稳定并突变到电流减小甚至消失的半绝缘态(下部),此时,通道要恢复到导电态可能需要增加到较大的电势差(U_2). Heckman^[79]认为具有负微分电阻特性的先导通道是不稳定的,但当电流增加到一定门限时,又变为稳定的. Mazur 和 Ruhnke^[80]坚持先导通道在整个电流范围的负微分电阻特性,但这似乎又与他们所说的通道在一定条件下的稳定性是矛盾的,而这种矛盾可能需要把微分电阻特性从先导通道扩展到先导通道两端的流光系统才可解决.

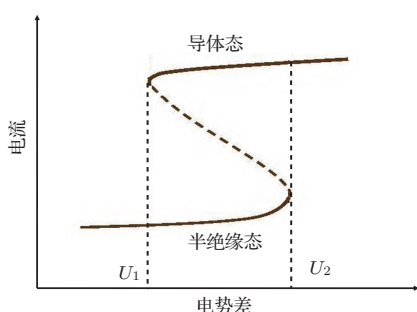


图6 闪电先导通道的负微分电阻特性及双稳态示意图
Fig. 6. Illustration of the negative differential resistance and bi-stable state of lightning leader channel.

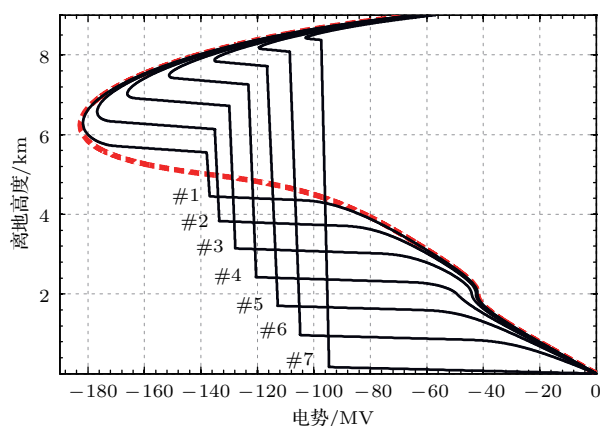


图7 地闪双向先导的电势演变模拟(通道发展阶段依次用数字1—7标示,更多细节可参考Chen等^[82])
Fig. 7. Evolution of potential profiles of developing negative cloud-to-ground leader (the stages of bi-directional leader extension are marked with numbers 1—7, for more details refer Chen et al.^[82]).

与实验室单极性放电相比,由于闪电先导内在的极性不对称性以及传输中背景电势的不对称性,双向先导可能更不稳定.根据数值模拟,无论地闪(图7)还是云闪(图8),当先导速度极性不对称时

(如负先导发展较快),通道电势将向发展较快(负先导所在)的一侧偏移,从而使通道电势增大,使先导的传输趋向更加稳定的对称.从图7和图8中还可以看出,通道发展中,这种由不稳定向稳定的自动调节,应该是通道稳定(导体)态存在的一种表现.然而,当失衡到达一定程度时,则自我调节失效,需要有反冲先导的出现,以达到新的平衡,此种情形可多次循环,直至放电消失.至于反冲先导引发的具体机制以及为何始发于正先导端,目前虽没有确定的结论,但有理由相信,无论哪一种机制,正负先导传输所需背景门限电场的明显差异(后者约是前者的两倍)可能是非常重要的因素.

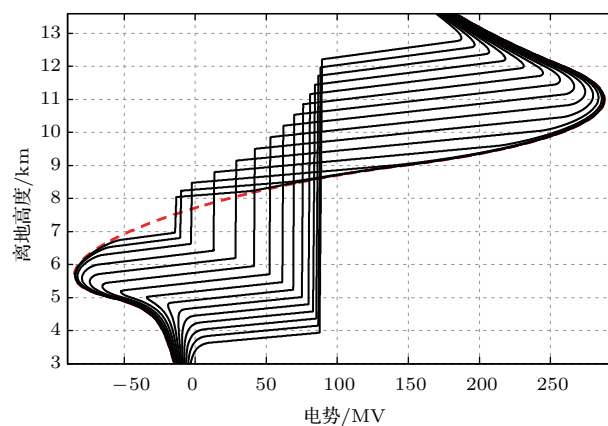


图8 云闪双向先导的电势演变模拟
Fig. 8. Evolution of potential profiles of bidirectional developing intra-cloud leader.

6 结 论

双向先导及其传输机制,是闪电物理的核心问题.本文根据闪电研究的最新进展,对闪电双向先导的理论、正、负先导及反冲先导的观测特征及机制进行了比较和总结,系统阐述了正负先导中连续性和间歇梯级性机制,强调了闪电双向先导中正负先导传输门限电场的不对称性,进一步指出正流光可能在闪电各种脉冲始发过程,如闪电始发、先导梯级性形成、反冲先导激发等过程中的独特作用.根据先导通道的负微分电阻特性及相应的通道不稳定性,提出了双向先导通道可能的双稳态性.其中一些问题,特别是反冲先导产生及通道稳态、非稳态的转化,仍需要通过数值模式进行更加深入的探讨.

LMA 资料由 NCAR/EOL 提供,并可从网站 <https://data.eol.ucar.edu/> 下载

参考文献

- [1] Schonland B F J 1938 *Proc. Roy. Soc. A* **164** 132
- [2] Kasemir H W 1960 *J. Geophys. Res.* **65** 1873
- [3] Mazur V 1989 *J. Geophys. Res.* **94** 3311
- [4] Mazur V 1989 *J. Geophys. Res.* **94** 3326
- [5] Castellani A, Bondiou-Clergerie A, Lalande P, Bonany A, Gallimberti I 1998 *IEE. Proc. Sci. Meas. Technol.* **145** 193
- [6] Chen M, Watanabe T, Takagi N, Du Y, Wang D, Liu X 2003 *J. Geophys. Res.* **108** 4240
- [7] van der Velde O, Montanya J 2013 *J. Geophys. Res.* **118** 13504
- [8] Shao X, Krehbiel P 1996 *J. Geophys. Res.* **101** 26641
- [9] Thomas R J, Krehbiel P R, Rison W, Hamlin T, Harlin J, Shown D 2001 *Geophys. Res. Lett.* **28** 143
- [10] Warner T A, Saba M M F, Schumann C, Helsdon J H, Orville R E 2016 *J. Geophys. Res. Atmos.* **121** 9251
- [11] Montanya J, van der Velde O, Williams E R 2015 *Sci. Rep.* **5** 15180
- [12] Rison W, Krehbiel P R, Stock M G, Edens H E, Shao X M, Thomas R J, Stanley M A, Zhang Y 2016 *Nat. Commun.* **7** 10721
- [13] Biagi C J, Uman M A, Hill J D, Jordan D M 2014 *J. Geophys. Res. Atmos.* **119** 8160
- [14] Wang Z, Qie X, Jiang R, Wang C, Lu G, Sun Z, Liu M, Pu Y 2016 *J. Geophys. Res. Atmos.* **121** 14307
- [15] Jiang R, Qie X, Zhang H, Liu M, Sun Z, Lu G, Wang Z, Wang Y 2017 *Sci. Rep.* **7** 3457
- [16] Saba M M F, Cummins K L, Warner T A, Krider E P, Campos L Z S, Ballarotti M G, Pinto J O, Fleenor S A 2008 *Geophys. Res. Lett.* **35** L07802
- [17] Mazur V, Ruhnke L H, Warner T A, Orville R E 2013 *J. Electrostat.* **71** 763
- [18] Qie X, Pu Y, Jiang R, Sun Z, Liu M, Zhang H, Li X, Lu G, Tian Y 2017 *J. Geophys. Res. Atmos.* **122** 586
- [19] Wang D, Takagi N, Gamera W R, Uman M A, Jordan D M 2015 *J. Geophys. Res. Atmos.* **120** 10637
- [20] Hill J D, Uman M A, Jordan D M, Ngim T, Gamera W R, Pilkey J, Caicedo J 2016 *J. Geophys. Res. Atmos.* **121** 853
- [21] Stock M G, Akita M, Krehbiel P R, Rison W, Edens H E, Kawasaki Z, Stanley M A 2014 *J. Geophys. Res. Atmos.* **119** 3134
- [22] Stock M G, Krehbiel P R, Lapierre J, Wu T, Stanley M A, Edens H E 2017 *J. Geophys. Res. Atmos.* **122** 8135
- [23] Lu W, Chen L, Ma Y, Rakov V A, Gao Y, Zhang Y, Yin Q, Zhang Y 2013 *Geophys. Res. Lett.* **40** 5531
- [24] Jiang R, Qie X, Wang C, Yang J 2013 *Atmos. Res.* **129** 90
- [25] Lu G, Jiang R, Qie X, Zhang H, Sun Z, Liu M, Wang Z, Liu K 2014 *Geophys. Res. Lett.* **41** 9174
- [26] Zhang Y, Krehbiel P R, Zhang Y, Lu W, Zheng D, Xu L, Huang Z 2017 *Geophys. Res. Lett.* **44** 4332
- [27] Pu Y, Jiang R, Qie X, Liu M, Zhang H, Fan Y, Wu X 2017 *Geophys. Res. Lett.* **44** 7029
- [28] Qi Q, Lu W, Ma Y, Chen L, Zhang Y, Rakov V A 2016 *Atmos. Res.* **178** 260
- [29] Zhang Y, Lu W, Li J, Dong W, Zheng D, Chen S 2009 *Atmos. Res.* **91** 326
- [30] Wang C X, Qie X S, Jiang R B, Yang J 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 039203 (in Chinese) [王彩霞, 郗秀书, 蒋如斌, 杨静 2012 物理学报 **61** 039203]
- [31] Wang X J, Yuan P, Cen J Y, Zhang T L, Xue S M, Zhao J C, Xu H 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 109201 (in Chinese) [王雪娟, 袁萍, 岑建勇, 张廷龙, 薛思敏, 赵金翠, 许鹤 2013 物理学报 **62** 109201]
- [32] Mazur V, Ruhnke L H 1998 *J. Geophys. Res.* **103** 23299
- [33] Iudin D I, Rakov V A, Mareev E A, Iudin F D, Syssoev A A, Davydenko S S 2017 *J. Geophys. Res. Atmos.* **122** 6416
- [34] Tan Y B, Liang Z W, Shi Z, Zhu J, Guo X 2014 *Sci. China: Earth Sci.* **57** 2125
- [35] Krehbiel P R, Rioussset J A, Pasko V P, Thomas R J, Rison W, Stanley M A, Edens H E 2008 *Nat. Geosci.* **1** 233
- [36] Rioussset J A, Pasko V P, Krehbiel P R, Rison W, Stanley M A 2010 *J. Geophys. Res.* **115** A00E10
- [37] Mazur V, Runke L H 1993 *J. Geophys. Res.* **98** 12913
- [38] Mazur V 2016 *Principles of Lightning Physics* (Bristol: IOP Publishing) pp1–183
- [39] Bazelyan E, Raizer Y 2000 *Lightning Physics and Lightning Protection* (Bristol: IOP Publishing, London) pp27–221
- [40] Williams E R 2006 *Plasma Sources Sci. Technol.* **15** S91
- [41] Gou X, Chen M, Du Y, Dong W 2010 *Geophys. Res. Lett.* **37** L11808
- [42] Gou X, Chen M, Zhang G 2018 *J. Geophys. Res. Atmos.* **123** 1351
- [43] Huo Y L, Zhang G S, Lü S H, Yuan P 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 059201 (in Chinese) [火元莲, 张广庶, 吕世华, 袁萍 2013 物理学报 **62** 059201]
- [44] Sun K Y, Zhao X Y, Zhang G L, Zang H M 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 029204 (in Chinese) [孙柯岩, 赵小莹, 张功磊, 臧洪明 2014 物理学报 **63** 029204]
- [45] Gallimberti I, Bacchiega G, Bondiou-Clergerie A, Lalande P 2002 *C. R. Phys.* **3** 1335
- [46] da Silva C L, Pasko V P 2013 *J. Geophys. Res.* **118** 13561
- [47] Williams E, Heckman S 2012 *J. Aerospace Lab.* **5** 1
- [48] Rison B 2014 *Colorado Lightning Mapping Array (LMA) Data. Version 10 UCAR/NCAR- Earth Observing Laboratory.* <https://data.eol.ucar.edu/dataset/353.209>. Accessed 28 September, 2018
- [49] Kulikovskiy A A 2000 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **33** 1514
- [50] van der Velde O A, Montanya J, Soula S, Pineda N, Mlynarczyk J 2014 *J. Geophys. Res. Atmos.* **119** 12755
- [51] Lapierre J L, Sonnenfeld R G, Stock M, Krehbiel P R, Edens H E, Jensen D 2017 *J. Geophys. Res. Atmos.* **122** 4150
- [52] Becerra M, Cooray V A 2006 *IEEE Trans. Power Delivery* **21** 897
- [53] Gallimberti I 1979 *J. Phys. Colloq.* **40** 193
- [54] Les Renardieres Group 1977 *Electra* **53** 31
- [55] Domens P, Gilbert A, Dupuy J, Hutzler B 1991 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **24** 1748

- [56] Chen S, Zeng R, Zhuang C, Zhou X, Ding Y 2016 *Plasma Sci. Technol.* **18** 305
- [57] Kostinskiy A Y, Syssoev V S, Bogatov N A, Mareev E A, Andreev M G, Bulatov M U, Sukharevsky D I, Rakov V A 2018 *J. Geophys. Res. Atmos.* **123** 5360
- [58] Bazelyan E M, Raizer Y P, Aleksandrov N L 2007 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **40** 4133
- [59] Raizer Y P 1991 *Gas Discharge Physics* (New York: Springer-Verlag) pp222-223
- [60] Popov N A 2009 *Plasma Phys. Rep.* **35** 785
- [61] Lalande P, Bondiou-Clergerie A, Bacchiega G, Gallimberti I 2002 *C. R. Phys.* **3** 1375
- [62] Wang D, Takagi N 2011 *J. Geophys. Res.* **116** D10205
- [63] Visacro S, Guimaraes M, Murta Vale M H 2017 *J. Geophys. Res. Atmos.* **122** 12786
- [64] Douglas-Hamilton D H, Mani S A 1974 *J. Appl. Phys.* **45** 4406
- [65] Sigmond R S 1984 *J. Appl. Phys.* **56** 1355
- [66] Luque A, Stenbaek-Nielsen H C, McHarg M G, Haaland R K 2016 *J. Geophys. Res. Space* **121** 2431
- [67] Phelps C T 1974 *J. Atmos. Sol-Terr. Phys.* **36** 103
- [68] Schonland B F J, Malan D J, Collens H 1935 *Proc. Roy. Soc. A* **152** 595
- [69] Gorin B N, Levitov V I, Shkilev A V 1976 *IEE Conf. Publ.* **143** 274
- [70] Les Renardieres Group 1981 *Electra* **74** 67
- [71] Kochkin P, Lehtinen N, van Deursen A P J, Østgaard N 2016 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **49** 425203
- [72] Chen M, Takagi N, Watanabe T, Wang D, Kawasaki Z I, Liu X 1999 *J. Geophys. Res.* **104** 27573
- [73] Wang D, Takagi N, Uman M A, Jordan D M 2016 *J. Geophys. Res. Atmos.* **121** 14612
- [74] Hill J D, Uman M A, Jordan D M 2011 *J. Geophys. Res.* **116** D16117
- [75] Biagi C J, Uman M A, Hill J D, Jordan D M, Rakov V A, Dwyer J R 2010 *J. Geophys. Res.* **115** D23215
- [76] Lapierre J L 2015 *Ph. D. Dissertation* (New Mexico: Institute of Mining and Technology)
- [77] Cooray V, Arevalo L 2017 *Atmosphere* **8** 245
- [78] Warner T A, Cummins K L, Orville R E 2012 *J. Geophys. Res.* **117** D19109
- [79] Heckman S 1992 *Ph. D. Dissertation* (Cambridge: Massachusetts Institute of Technology)
- [80] Mazur V, Ruhnke L H 2014 *J. Geophys. Res.* **119** 2786
- [81] Agop M, Nica P, Niculescu O, Dimitriu D G 2012 *J. Phys. Soc. Jpn.* **81** 064502
- [82] Chen M L, Gou X Q, Du Y P 2013 *Atmos. Res.* **125** 76

Theory and observation of bidirectional leader of lightning: Polarity asymmetry, instability, and intermittency*

Gou Xue-Qiang^{1)†} Zhang Yi-Jun²⁾ Li Ya-Jun³⁾ Chen Ming-Li⁴⁾

1) (College of Physics and Electronic Engineering, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China)

2) (Institute of Atmospheric Sciences, Department of Atmospheric and Oceanic Sciences, Fudan University, Shanghai 200438, China)

3) (Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

4) (Department of Building Services Engineering, The Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong, China)

(Received 1 June 2018; revised manuscript received 24 July 2018)

Abstract

A lightning discharge in a thundercloud usually starts with a locally breakdown process (preliminary breakdown) followed by a widely extending leader process. In the early 1960 s, from the view of fundamental electrostatics [Kasemir H W 1960 *J. Geophys. Res.* **65** 1873] suggested that the lightning leader is initiated by an electrodeless discharge with a zero-net-charge conductive channel extending bidirectionally in the ambient electric field of the thundercloud, i.e. the bidirectional leader theory. However, the bidirectional leader theory has just been recognized by lightning researchers since the late 1980 s, when airplane [Mazur V 1989 *J. Geophys. Res.* **94** 3326] and rocket-triggered lightning experiments have proven that the bidirectional leader theory provides the best common physical basis for explaining a variety of lightning processes. Nevertheless, challenges still remain in other properties of the bidirectional leader theory, such as the polarity asymmetry, the sustainability, instability and restrike of a leader channel, which are all the key concerns of lightning researches.

In the present paper, we first briefly review the concept and development of the bidirectional leader theory and its appearances in various lightning processes, especially in the negative stepped leader and recoil leader process. By reviewing a variety of field observation data of inception thresholds and propagation properties of long gap spark discharges, we put forward and emphasize an alternative polarity asymmetry of the lightning leader: the polarity asymmetry of continuity, i.e., the continuity of positive leader and the intermittency of negative leader. Based on the detailed discussion, we then argue that the stepwise positive leader may be restrikes due to temporary instability of a continuous positive leader, while the intermittency of negative leader manifests not only a relatively regular stepped leader but also a more erratic negative recoil leader. We further propose that the positive leader-streamer may play a unique role in igniting all kinds of intermittent events in lightning, including the initiation of lightning with the fast positive streamer, the formation of space leader in front of a negative stepped leader with the secondary positive streamer, and the reformation of recoil-leader in an instability leader channel due to its low threshold of inception and propagation. Finally, we discuss the self-adjustable ability of a bidirectional leader, suggesting that the potential drop along the streamer channel in front of the leader tip may be an important factor for stabilizing the bidirectional leader channel.

Keywords: lightning, bidirectional leader, polarity asymmetry, intermittency

PACS: 52.80.Mg, 92.60.Pw

DOI: 10.7498/aps.67.20181079

* Project supported by the Major Research plan of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 91537209) and the Research Grant Council of the Hong Kong Government, China (Grant No. PolyU 152139/15E).

† Corresponding author. E-mail: gxq411@126.com