

青藏高原单体雷暴的电荷结构及“晴天霹雳”闪电成因

郅秀书^{1,2*}, 刘冬霞¹, 李丰全³, 孙竹玲¹, 韦蕾^{1,2}, 孙春发^{1,2}, 朱可欣^{1,2}, 吕慧敏^{1,2}, 唐国瑛⁴, 袁善锋¹, 蒋如斌¹, 王宇³

1. 中国科学院大气物理研究所, 大气环境与极端气象全国重点实验室/中层大气与全球环境探测重点实验室, 北京 100029

2. 中国科学院大学地球与行星科学学院, 北京 100049

3. 国网电力科学研究院武汉南瑞电力集团, 武汉 430206

4. 中国气象局武汉暴雨研究所, 武汉 430205

* 联系人, E-mail: qjex@mail.iap.ac.cn

2024-10-30 收稿, 2025-01-03 修回, 2025-02-06 接受, 2025-02-10 网络版发表

国家自然科学基金重点项目(42230609)和第二次青藏高原综合科学考察研究项目(2019QZKK0104)资助

摘要 由于青藏高原独特的热力和动力作用及复杂的地形特征, 夏季经常发生雷暴对流活动. 但由于时空尺度小且高海拔地区观测困难, 高原雷暴和闪电一直是很具挑战性的研究问题. 本文利用自主研发的闪电甚高频宽带成像干涉仪等技术, 在拉萨观测到了一次产生2次罕见晴天霹雳闪电的单体雷暴过程, 通过详细研究晴天霹雳放电过程和对应的雷暴电荷结构, 揭示了晴天霹雳的产生机制. 与平原地区雷暴先发展云上部偶极电荷结构不同, 高原雷暴单体初始阶段呈现上负下正的负偶极电荷结构. 雷暴成熟阶段自上而下呈现正-负-正的三极电荷结构, 分别位于低于 -30°C , $-30\sim-15^{\circ}\text{C}$, 以及高于 -10°C 的环境温度区域. 晴天霹雳产生于上部偶极子, 始发于中部负电荷区和上部正电荷区之间, 正先导向下部负电荷区发展, 负先导向上发展. 当向上的负先导到达上部正电荷区后, 水平传播并穿出云体, 最终发展成为从雷暴云区传播到晴空区域并闪击地面的晴天霹雳, 两次晴天霹雳距降水区边缘的距离分别为3.6和3.8 km. 雷暴单体尺度小以及上部正电荷区比下部负电荷区弱的不平衡偶极子是引发晴天霹雳的主要原因. 本研究不仅揭示了罕见晴天霹雳的放电过程和机理, 也提供了高原雷暴电荷结构和闪电活动特征多样性的直接观测证据.

关键词 青藏高原, 雷暴电荷结构, 闪电活动, 晴天霹雳, 闪电甚高频干涉仪



郅秀书 中国科学院大气物理研究所研究员, 中国科学院大学岗位教授, 连续两届当选国际大气电学委员会(ICAE)主席. 曾任国家“863”计划专家、国家“973”项目首席科学家, 国家重大科研仪器研制项目负责人. 主要从事大气电学和中尺度气象学研究, 通过先进观测技术的创新和自主研发, 发现雷电放电新类型和机理, 提出雷暴云电荷分布新模式和面向数值预报模式的雷电资料同化方案, 建立火箭人工引雷应用研究新体系. 因在“青藏高原雷暴以及雷电与人工引雷研究方面的突破性贡献”当选美国地球物理联合会(AGU)会士. 先后获中国青年科技奖、全国三八红旗手、中国十大女杰、中国科学院优秀导师等荣誉称号, 作为第一完成人获省部级科技奖励一、二等奖和优秀等级4项. 出版学术著作4部, 发表期刊论文近300篇, 获发明专利10多项. 担任JGR: Atmospheres期刊专业主编, Atmospheric Research副主编, 《大气科学》、《气象学报》、Advances in Atmospheric Sciences、Journal of Meteorological Research等副主编或编委.

引用格式: 郅秀书, 刘冬霞, 李丰全, 等. 青藏高原单体雷暴的电荷结构及“晴天霹雳”闪电成因. 科学通报, 2025, 70: 944–954

Qie X, Liu D, Li F, et al. Charge structure of an isolated thunderstorm on the Tibetan Plateau and the formation of bolt-from-the-blue lightning (in Chinese). Chin Sci Bull, 2025, 70: 944–954, doi: [10.1360/TB-2024-1144](https://doi.org/10.1360/TB-2024-1144)

青藏高原位于印度季风和西风共同作用区,是世界上海拔最高的高原,被称为“世界屋脊”,其独特的热力、动力作用和大地形特征,不仅直接影响中国东部和西南部的气候和天气变化,也对全球的气候变化和环流特征具有很大影响^[1-3]。同时,青藏高原上特殊的地气相互作用也导致高原夏季雷暴频发,雷暴日数与我国雷暴和闪电最活跃的东南沿海地区类似^[1,4],但高原雷暴持续时间短,其对流特征相对同纬度平原地区较弱^[5-7]。

自21世纪初以来,我国学者开始在青藏高原东北部利用多站闪电电场变化同步测量,估算闪电放电中和的电荷源位置和电荷量,进而研究雷暴云内电荷结构,研究发现,青藏高原雷暴具有特殊的三极性电荷结构特征,云底部的正电荷区较平原地区分布范围广、强度大^[8-10]。Qie等人^[11]利用低分辨率甚高频干涉仪定位、电场变化仪和大气电场仪在高原中部那曲地区开展观测,分析了青藏高原典型雷暴的电荷结构,首次提出了雷暴的三极性电荷结构首先发展下部的负偶极结构。在整个雷暴期间,较大的底部正电荷区常导致较多的负极性云闪,在雷暴后期可发生负地闪,而正地闪则较少发生。此外,具有正常三极性电荷结构的雷暴也常有发生^[12]。基于电场探空的穿雷暴云原位观测也验证了高原边缘地区的雷暴电荷结构多为云下部具有大范围正电荷区的三极性电荷结构^[13]。

随着探测技术的发展,利用三维闪电甚高频(VHF)辐射源定位系统在高原雷暴云电荷结构方面取得了很大进展。Liu等人^[14]利用高精度闪电VHF干涉仪和天气雷达等观测研究,首次获得了底部为大范围正电荷区的高原中部雷暴云从初始阶段“上负下正”反偶极性逐渐发展为“正-负-正”三极性电荷结构的演化特征,不同对流单体合并导致的两个相邻负电荷区可以同时参与闪电放电。Li等人^[15,16]发现在位于青藏高原东北边缘的青海大通地区,雷暴发展阶段电荷结构为反偶极性。雷暴单体在进入成熟阶段后,单体合并导致雷暴云电荷结构转变为三极性结构;而在消散阶段,雷暴转变为反偶极性结构或正常偶极性结构。较弱的雷暴可能仅产生下部反偶极电荷结构^[17],电荷结构的变化对闪电的类型和频数也有显著影响^[10,11,18-20],基于数值模拟研究也证实了这一地区雷暴电荷结构的演化特征^[21,22]。可见,高原雷暴云电荷结构具有多样性,甚至同一雷暴中的不同发展阶段以及云内不同位置的电荷结构都可能存在差异。

闪电一般产生于对流旺盛并强烈起电的雷暴云内,平均约2/3的闪电在云内或云与空气间发展传播,称为云闪,约1/3向云下发展并击中地球,称为地闪,但也有极少的闪电从雷暴云内延伸出来,在晴朗的天空传播相对较长的距离后,在头顶上方无云的情况下向下击中地面,称之为“晴天霹雳(bolt-from-the-blue)”。这种罕见的“晴天霹雳”闪电也是一种地闪放电过程,虽然很少发生,但由于头顶无云无雨,有可能在毫无征兆的情况下造成雷击事故^[23,24],因此,这种闪电的形成原因值得深入探讨。

在第二次青藏高原综合科学考察期间,我们在拉萨开展了高原雷暴和闪电综合观测^[25],利用具有放电过程和通道分辨能力的闪电VHF干涉仪精细定位和电场变化仪等观测到了两例罕见的“晴天霹雳”闪电完整过程,本文将给出这两次放电过程的完整图像,通过研究对应的雷暴电荷结构演变特征,并结合天气雷达回波和探空等,揭示晴天霹雳闪电发生的原因和机制。

1 资料与方法

本研究所用资料来自第二次青藏高原综合科学考察期间开展的高原雷暴和闪电综合观测实验,主要仪器设备为自主研发的闪电VHF干涉仪,由于其对闪电放电通道具有精细定位能力,可以高时间分辨率确定闪电放电的通道发展结构和传输演变过程^[26,27]。VHF干涉仪利用了闪电过程辐射的VHF频段电磁波进行定位,因此不受云层的遮挡,可对发生于云内的闪电全过程、全通道进行精细定位。闪电干涉仪采用VHF天线探测闪电辐射源信号,并依次通过带通滤波器、放大器及相同长度和频响特性的同轴电缆接入室内采集设备进行数据采集记录。所有采样率为400或500 MS/s,采样频段为35~70或140~300 MHz,天线基线长度约50~100 m^[27,28]。研究同时利用了闪电快电场、慢电场测量仪资料、大气平均电场仪资料用于闪电类型和频数的判别^[29,30]。国家电网闪电定位网提供的地闪定位数据用于确定闪电的距离,其定位误差约为489 m^[31]。

所用的雷达资料来自拉萨C波段天气雷达,距离观测站点40 km,探测半径为230 km,每6 min完成一次从0.5°~19.5°的9层扫描。雷达组合反射率选取每一层最大的雷达反射率因子,通过质控和双线性差值,将雷达极坐标数据转化为直角坐标数据(水平分辨率0.01°×0.01°;垂直分辨率500 m)。此外,研究中还利用了由中国气象局提供的探空数据及地面观测资料,用于

确定雷暴云发展演化阶段的云底高度和环境温度等。

雷暴云内电荷结构的判别主要依据闪电正、负极性先导在传播过程中的不同物理特征。闪电通道辐射源定位在不同极性电荷区呈现明显的非对称分布特征,一般认为,闪电始发在两个极性相反的电荷区之间,并从起始点开始双向传播,正极性先导通道在雷暴云中的负电荷区发展传输,而负极性先导头部在正电荷区发展传输^[29,32,33]。正先导的发展速度为 $10^4\sim 10^5$ m/s量级,负先导传输速度比正先导大一个量级,为 $10^5\sim 10^6$ ms⁻¹。正先导的VHF辐射强度一般弱于负先导的辐射强度。因此,利用闪电VHF干涉仪定位系统得到闪电放电辐射源的时空分布信息,根据辐射源的发展速度、通道密集程度和发展特征,可以判断其放电极性,并推断出对放电有贡献的云内电荷区的极性。

针对一次雷暴过程,利用上述判断依据,对每一次放电过程内的辐射源极性进行分类,可以得到不同极性通道的方位角-仰角分布,并针对不同时段进行叠加,从而可以反演出该雷暴云内参与放电的电荷结构演变。虽然通过干涉仪得到的闪电辐射源定位结果为仰角-方位角二维信息,没有高度和水平距离的信息,但由于高原雷暴的水平尺度小,通过天气雷达观测和环境温度并参考闪电定位网给出的闪电距离信息,可在一定程度上判别小尺度雷暴过程的电荷结构特征^[13]。

2 分析结果

两次“晴天霹雳”闪电发生于2021年8月21日午后在拉萨的一次小尺度孤立雷暴单体过程中,雷暴持续时间约45 min。08:00时(北京时)探空显示对流有效位能(CAPE)值为145 J/kg,可能的云底高度为1 km,对应高度环境温度为6°C,低层存在明显的风切变。对这次高原雷暴过程,闪电VHF干涉仪定位仅探测到了3次负地闪,其中2次为“晴天霹雳”放电过程。

雷暴云内最大雷达回波随时间的演化特征可以反映出雷暴的对流结构特征^[34,35]。图1给出了这次雷暴对应的最大雷达回波反射率随时间和高度的演化特征,14:20时对流单体触发,对流强度较弱并维持了一段时间,14:30时对流开始发展增强,雷达回波反射率开始增加,15:00左右最大雷达回波强度达到了50 dBZ,20 dBZ的云顶高度达到8 km,35 dBZ回波高度达到6 km,对应环境温度为-25°C。由于这次雷暴过程对流较弱,大于40 dBZ的对流核心区仅维持了30 min,15:30时对流核消失,雷暴单体迅速消亡。

雷暴对流单体14:24时已经在测站西南方向生成,并自西向东移动(图2)。14:48时,对流逐渐发展增强,单体对流中心最大雷达回波强度达到了40 dBZ。14:54时,此单体开始靠近测站,此时最大的强回波反射率达到50 dBZ。15:06时左右,此雷暴单体继续发展,最强雷达回波依旧维持在50 dBZ。15:12时左右,雷暴单体的强对

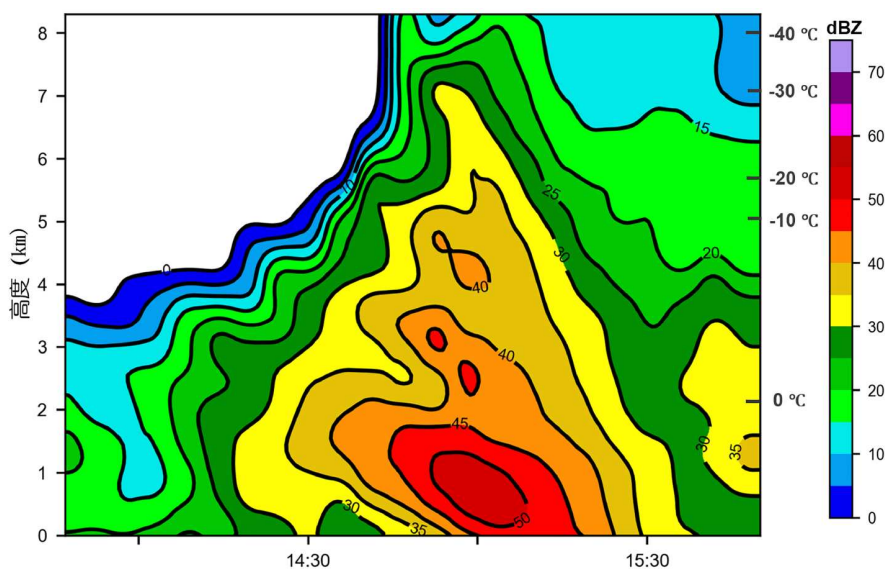


图1 雷暴云演化过程中雷达最大反射率随时间的演化。彩色填色和黑色等值线代表雷达反射率,左侧坐标代表高度(km, AGL),右侧代表环境温度(°C)

Figure 1 The time-height evolution of maximum radar reflectivity of the thunderstorm. The color shade and black contour stand for radar reflectivity (unit: dBZ). The left-hand axis stands for the height (km, AGL), and the right-hand axis for the environmental temperature (°C)

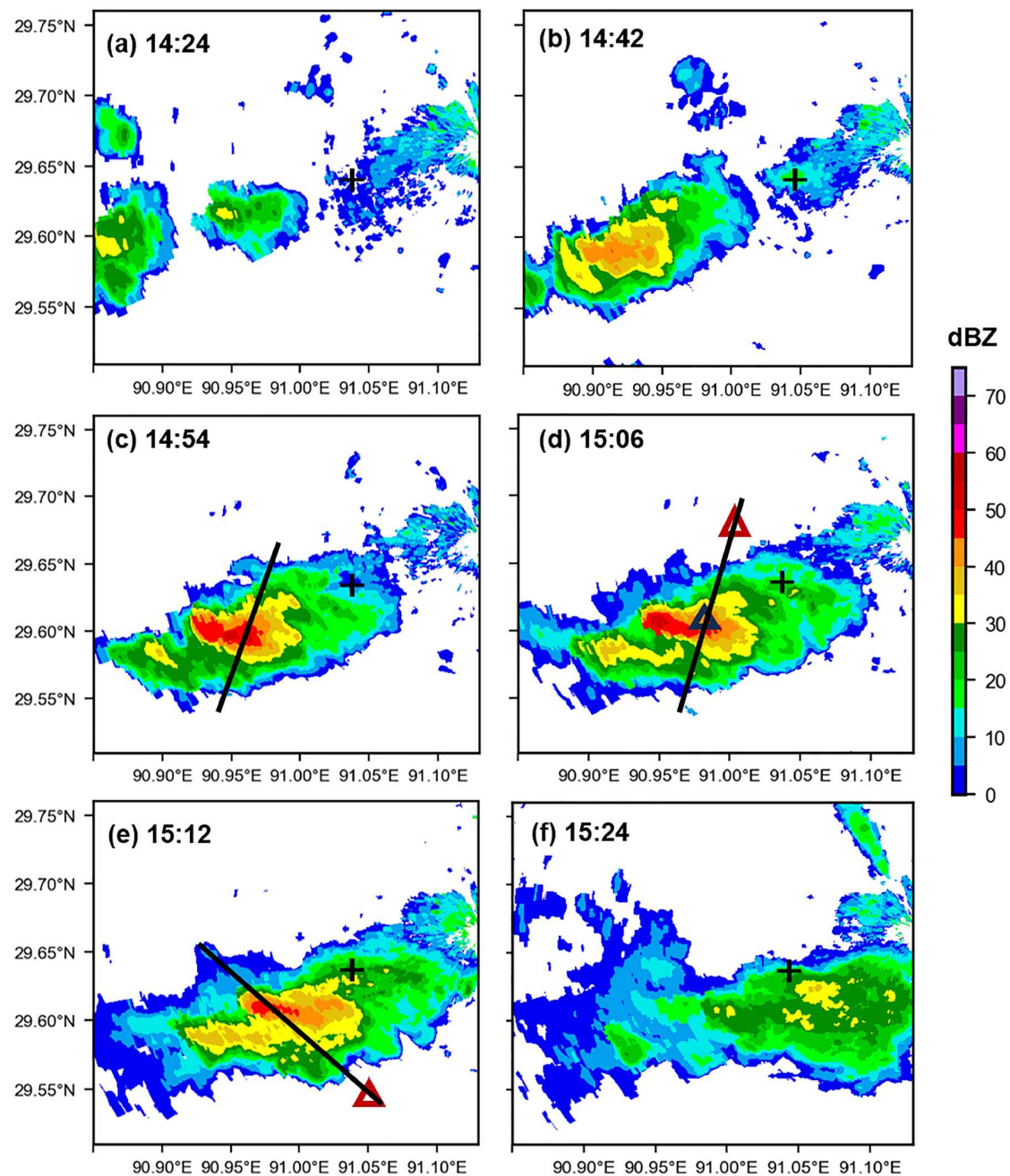


图 2 2021年8月21日不同时刻雷暴单体的雷达组合反射率和国家电网地闪定位网给出的三次地闪定位点位置。(a) 14:24时; (b) 14:48时; (c) 14:54时; (d) 15:06时; (e) 15:12时; (f) 15:24时。“+”为观测站点, 黑色三角为地闪发生的位置, 深红色三角为发生晴天霹雳的负地闪, 黑色实线为后文讨论的雷达回波剖面位置

Figure 2 Composite radar reflectivity of the thunderstorm cell and the location results for 3 cloud-to-ground (CG) lightning flashes from the State Grid Lightning Detection Network on August 21, 2021. (a) 14:24, (b) 14:48, (c) 14:54, (d) 15:06, (e) 15:12, and (f) 15:24. The “+” stands for the observational site, the black triangle for the location of negative CG flash, the dark red triangle for the bolt-from-the-blue, and the black line for the position of radar cross-section to be discussed later

流区边缘已接近测站, 期间15:07时测站开始记录到降雨, 但雨强较小。随后雷暴单体继续向东移动。

图3给出了大气平均电场仪测量到的此次雷暴单体过程的地面电场随时间的演化, 其中的脉冲变化由

闪电放电引起。可以看出,虽然放电频数低,但闪电强度很强。15:00时,对流发展已比较旺盛,雷达组合反射率达到50 dBZ以上,大气电场仪记录到一个负极性脉冲,大气电场幅值从-274 V/m变化到-334 V/m,但VHF干涉仪和闪电快、慢天线电场变化仪都没有观测到闪电,国家电网地闪定位网也没有探测到地闪发生,因此认为该放电脉冲可能是弱的云闪放电产生的。15:02、

15:06和15:12时分别发生了一次强放电过程(图3箭头所示)。根据快天线波形特征、闪电VHF干涉仪定位结果以及国家电网地闪定位网给出的回击点位置,三次闪电均为负地闪,三次地闪接地点距离测站水平距离分别为7.3、5.1和11.1 km,接地点位置分别在测站的西南方、西北方和东南方。随后闪电VHF干涉仪再没有探测到闪电的发生。

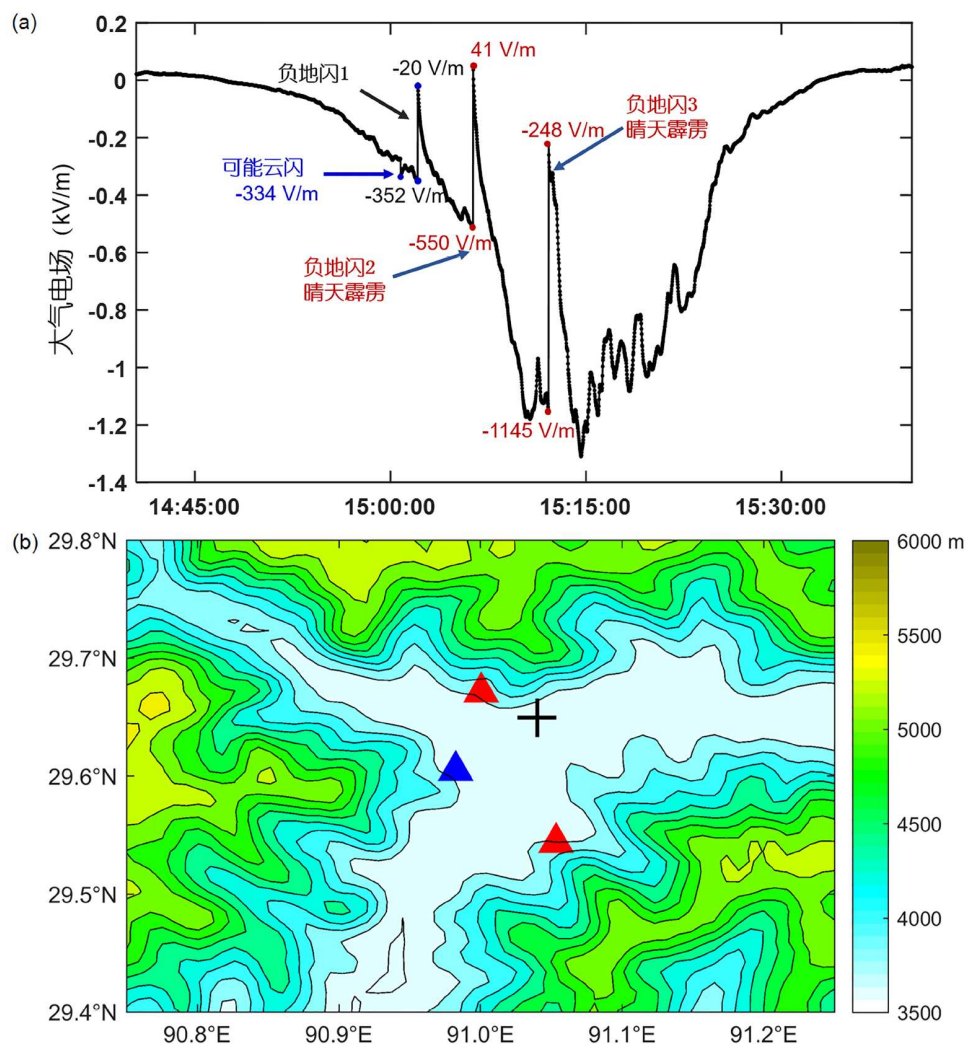


图 3 2021年8月21日雷暴单体的大气电场演化、地闪回击点位置与海拔高度的分布图。(a) 地面大气电场随时间的演化(基于大气电学定义,大气电场正值代表头顶正电荷区占主导,电场的正极性脉冲变化代表负极性放电),图中不同蓝色箭头表示强放电过程,不同颜色点表示不同负地闪对应的大气电场幅值变化。(b) 回击点位置和海拔高度分布的叠加,“+”代表观测站点,蓝色三角代表负地闪1,红色三角代表两次晴天霹雳闪电

Figure 3 Surface electric field evolution of the thunderstorm cell on 21 Aug, 2021, CG lightning grounding location and the distribution of altitude contour. (a) Surface electric field of the thunderstorm (based on the polarity definition of atmospheric electricity. Positive electrical field indicates the predominance of positively charged region overhead, and positive pulses indicate negative discharges). Different colored arrows mark the strong discharge, and different colored points in the figure represent the electric field amplitudes corresponding to different negative CG flashes. (b) Superposition of the lightning grounding points on the distribution of altitude contour. “+” stands for the observational site, blue triangle represents the location of CG flash 1, and red triangles represent the location of two bolt-from-the-blue discharges

从国家电网地闪定位网给出的闪电接地点结果可见,发生在15:02时的负地闪1和15:12时的负地闪3的击地点均在山上,地势较高,且负地闪3击地点的山坡高度显著高于负地闪1的击地位置,而15:06时负地闪2的接地点在山谷内。将地闪击地点位置和海拔高度分布的叠加发现,第一个负地闪的接地点在雷暴的对流区(雷达反射率大于40 dBZ)下方,而发生在15:06时的负地闪2和15:12时的负地闪3接地点均位于雷暴单体覆盖范围之外,这两次负地闪接地点上空无云,因此这两次负地闪属于“晴天霹雳”事件。同时,闪电VHF干涉仪定位也证实了这两次地闪为晴天霹雳闪电。

通过地闪定位估算出负地闪2接地点水平距离雷暴对流中心约8.0 km。根据Fuelberg等人^[36]介绍的衡量闪电水平延展距离的方法,计算发现该雷暴发生时,负地闪2接地点到云砧区边缘(以雷达回波0 dBZ为界)水平距离约为2.2 km,到降水区边缘(以雷达回波18 dBZ为界)的距离约为3.6 km。负地闪3接地点到对流中心的水平距离约为9.1 km,到云砧区边缘的距离约为2.4 km,到降水区边缘的水平距离约为3.8 km。

图4给出了VHF干涉仪精细定位得到的这三次负地闪的放电通道辐射源的空间叠加以及由其推断的参与放电的雷暴云电荷结构。此次孤立单体雷暴过程成熟阶段对应的云内电荷分布整体为上正-中负-下正的三极性电荷结构。14:54时对流发展最为旺盛,对流核中心为50 dBZ, 35 dBZ的回波高度达到5 km,对应的环境温度是-15℃。15:02时雷暴单体对流强度明显减弱,强回波的高度和范围均明显降低,35 dBZ雷达回波高度降低到4.2 km处,对应环境温度为-9℃。此时发生的负地闪1起始于三极性电荷结构的下部正电荷区和中部负电荷区之间,负先导(红色点)首先向下部正电荷区传输,随后出云(绿色点)并朝着地面传输,最后接地引发回击过程(图4(a), (b))。15:06时和15:12时发生两次“晴天霹雳”负地闪事件(图4(c)~(f)),在此时段对流强度相比于上一个时刻开始减弱,15:12时35 dBZ的回波高度降低至3.8 km左右,对应温度为-5℃,两次“晴天霹雳”闪电产生于上部偶极子,放电始发于中部负电荷区和上部正电荷区之间,正先导(色点)向下部负电荷区发展,负先导(红色点)向上发展。当向上的负先导到达上部正电荷区后水平发展伸出云体,并转向朝着仰角减小的方向(地面)传输(绿色点),最终发展成为从雷暴云区传播到晴空区域并闪击地面的“晴天霹雳”闪电。VHF二维干涉仪定位结果给出的接地点方位角和国家

电网地闪定位网给出的回击点位置方向一致。负地闪3的接地点仰角最大,负地闪1的接地点仰角次之,负地闪2的仰角最小,与国家电网给出的闪电接地点所处地势结果一致。

这次高原雷暴过程参与放电的电荷分布从下到上主要呈现正-负-正的三极性结构。负地闪1发生时,参与放电的电荷区是下部正电荷区和中部负电荷区,而晴天霹雳负地闪2和3发生时,参与放电的电荷区是上部的正电荷区和中部的负电荷区。除了这三次地闪过程之外,VHF干涉仪再无探测到其他闪电。虽然缺少第一个弱的云闪放电的定位结果,但如果只考虑参与这三次闪电放电的电荷区,上部和下部的正电荷区都比较活跃,下部正电荷区参与了第一次地闪,上部正电荷区参与了后两次“晴天霹雳”闪电。虽然上部和下部正电荷区都参与闪电放电,但相比中部负电荷区,可能两个区域的正电荷区强度相对较弱。较小的雷暴单体以及上部正电荷区比下部负电荷区弱的不平衡上部偶极子是引发“晴天霹雳”闪电的主要原因。

值得注意的是,与平原地区的三极性电荷结构雷暴先发展上部偶极电荷结构不同,高原雷暴先发展下部负偶极电荷结构。此外,图4中绿色点代表的后两次闪电部分负极性通道是在电荷中性的、雷暴云之外的空气中发展传输的,这也是将这两个闪电称之为“晴天霹雳”的另一个原因^[35]。负地闪1发生时(15:02时),雷暴已经发展到后期。从雷达回波可见(图4),发生的两例“晴天霹雳”事件的接地点距离云砧边缘(0 dBZ)和距离降水区边缘(18 dBZ)均大于发生在广州从化的一例晴天霹雳事件(分别为0.3和1.8 km)^[23],但比较接近Fuelberg等人^[36]给出的结果(分别为2.5 km和4.8 km)。分析发现,这两次“晴天霹雳”负地闪均不含继后回击过程,这可能与对应的雷暴单体较弱,起电效率较低有关。

3 结论和讨论

这次产生两次“晴天霹雳”闪电的高原雷暴过程为孤立的对流单体,对流强度弱、尺度小,生命史短。雷暴发展演化过程中VHF干涉仪仅探测到了3次负地闪,其中两次为“晴天霹雳”闪电。本文通过分析通道和过程可分辨的VHF干涉仪闪电辐射源的精细定位结果,给出了参与闪电放电的雷暴单体内电荷结构由负偶极性向三极性的演化过程,进一步揭示了发生“晴天霹雳”闪电的发展过程和对应的物理成因。

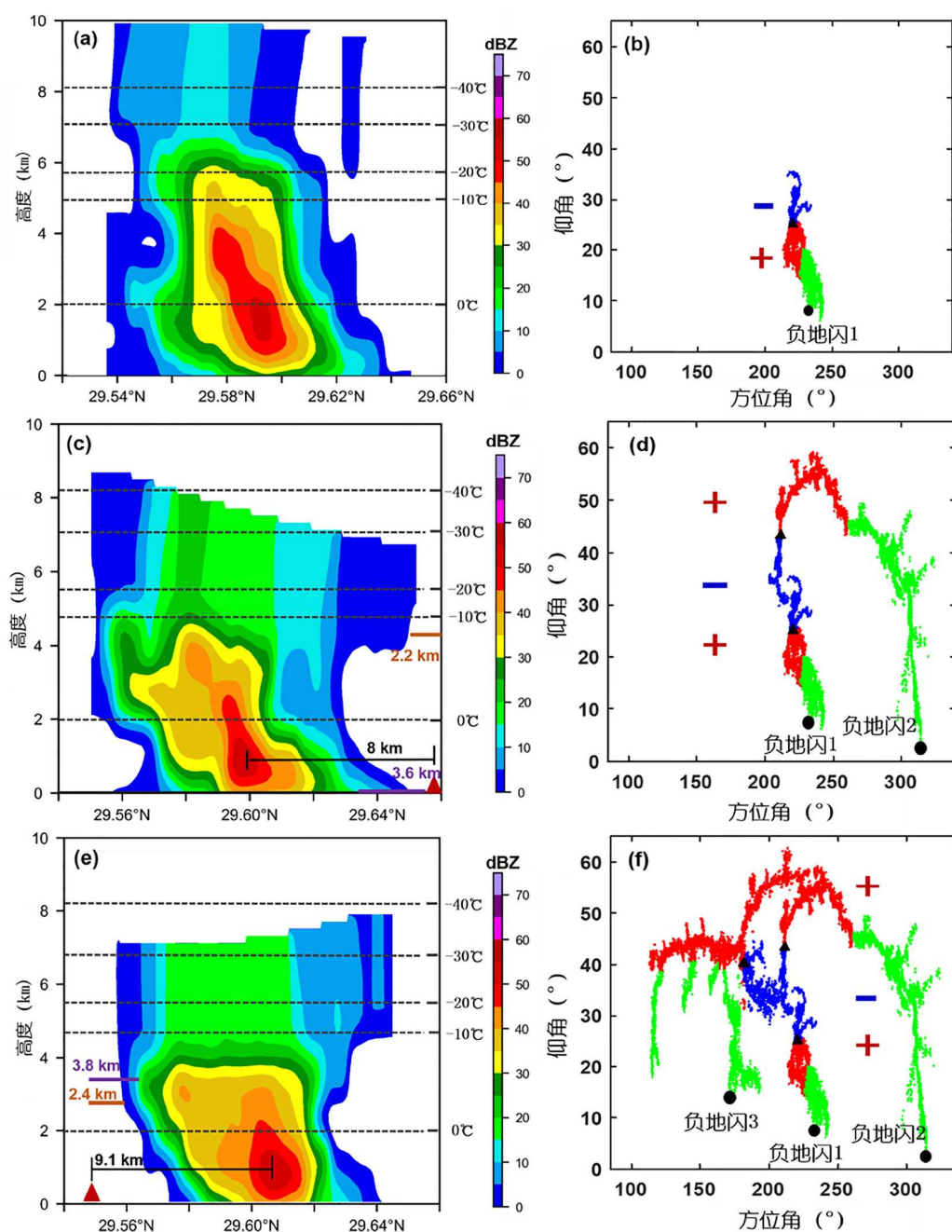


图 4 图2中黑实线所做的3个时次雷达回波剖面以及3次负地闪辐射源定位结果和推断的雷暴云电荷结构。雷达回波剖面(a) 14:54, (c) 15:06, (e) 15:12; 闪电辐射源分布(b) 14:45~15:02, (d) 14:45~15:06, (f) 14:45~15:12。红色三角为晴天霹雳发生的位置, 黑色实线为晴天霹雳位置到对流核中心的距离, 棕色实线为晴天霹雳到云砧边缘的距离, 紫色实线为晴天霹雳到18 dBZ降水回波的距离, 黑色点线代表不同高度对应的环境温度。红色“+”号和蓝色“-”号分别代表正、负电荷区, 红色点代表闪电负先导, 蓝色点代表正先导, 绿色点对应云外闪电通道。黑色三角形代表闪电的起始位置, 低仰角处的黑色圆形代表三次负地闪的接地位置

Figure 4 The cross-section of radar echo from the black solid line in Figure 2, positioning results of 3 negative cloud-to-ground (-CG) lightning discharges and the inferred charge structure of the thunderstorm from 14:45 to 15:40. The cross-section of radar echo at (a) 14:54, (c) 15:06, and (e) 15:12; the distribution of lightning radiation sources at (b) 14:45~15:02, (d) 14:45~15:06, and (f) 14:45~15:12. The red triangles stand for the locations of the bolt-from-the-blue. The black solid lines represent the distance from the bolt-from-the-blue to the convective center, the brown solid lines represent the distance to the edge of the cloud, and the purple solid lines represent the distance to the 18 dBZ precipitation echo. The black dotted lines stand for the ambient temperature corresponding to different heights. The red “+” and blue “-” dots represent for the positive and negative charge zones, respectively. The green dots for lightning channels outside the cloud. The black triangles indicate the initiation positions of 3 CG flashes, and the solid black circles at low elevation mark the grounding point of three -CG flashes

图5给出了这次雷暴对流单体不同发展阶段的电荷结构演化和放电特征,同时也给出了同纬度低海拔区域发生的雷暴电荷结构演化示意图。在高原雷暴单体的初始阶段对流发展较弱,雷达回波反射率达到30 dBZ的高度位于 -15°C 高度上,未探测到闪电。地面电场呈现与晴天电场相同的极性,因此推断得出雷暴呈现出负偶极性电荷结构,这与Qie等人^[10,11]和Liu等人^[14]的研究结果一致。已有的研究表明,在一定的条件下,软雹粒子分布在 $0^{\circ}\text{C}\sim-10^{\circ}\text{C}$ 高度区域的混合相态区域内,主要携带正电荷^[37]。高原对流单体中底部的大软雹粒子携带正电荷,而小的冰粒子(冰晶和软雹)携带负电荷^[17,38,39]。随着雷暴进一步发展,对流单体逐渐增强,成熟阶段最大的雷达回波反射率达到了50 dBZ,35 dBZ的高度达到5.5 km,在云的上部进一步发展出了一个较活跃的正电荷区,雷暴呈现出三极性电荷结构。雷暴云底部的正电荷区位于 -10°C 高度层,主要带电粒子为软雹粒子,中部负电荷区位于 $-15\sim-30^{\circ}\text{C}$ 温度区间内,负电荷主要由软雹携带。上部正电荷区位于 -30°C 高度以上,主要贡献者为冰晶和雪花。雷暴单体成熟阶段后期和消散期,对流中心面积较小,对流核心(雷达回波反射率大于35 dBZ)降至3 km以下,雷暴依旧呈现三极性电荷结构。

相关研究表明^[7,40,41],低海拔地区的雷暴过程往往维持时间更长,云内上升气流很强,对流发展更为旺盛,雷暴云顶高度能够达到15~16 km的高度处且云底高度较低。相同环境温度下,同纬度低海拔雷暴过程中混合

相态和冰相区域范围较大,云内起电更加强烈。通常情况下,低海拔雷暴单体大多也呈现出三极性电荷结构,但是常常先发展上部的偶极性电荷结构;随着雷暴发展,底部出现正电荷区。相比于同纬度低海拔雷暴过程,高原雷暴对流持续时间短,上升气流较小且强度较弱。高原雷暴电荷结构一般先发展底部负偶极电荷结构,随后在雷暴上部有可能出现正电荷区,有时上部正电荷区可能不出现^[10]。

相比于高原上发生的其他强对流雷暴天气过程^[11,14],这次孤立的雷暴单体属于尺度较小的雷暴过程且对流相对较弱,发展和消散都较快,强回波基本都集中在5 km以下对应 -15°C 温度范围内,系统内以暖雨过程为主,液态粒子转化为冰相粒子的效率减弱,云内起电效率较低,云体和电荷分布范围整体都较小。这次高原雷暴与高原其他雷暴的三极性电荷结构相比^[9-11,14],相同之处在于都是先发展下部的负偶极电荷结构,随后发展上部的正电荷区。但此次弱雷暴的上部和下部正电荷区都参与了放电,并以地闪为主,与通常底部出现大范围正电荷区的高原弱雷暴多发生反极性云闪存在一定差异,可能与雷暴发生于山脉上方,使得本来云底就比较低的高原雷暴易以发生地闪。“晴天霹雳”发生于雷暴后期的上部偶极子之间,由于云体较小且上部正电荷区相对于中部负电荷区较弱,因此发生于上部偶极子间的云内放电中和了上部的局部正电荷后,负极性通道水平发展并穿出云外后向下发展,形成了两次负极性“晴天霹雳”闪电。

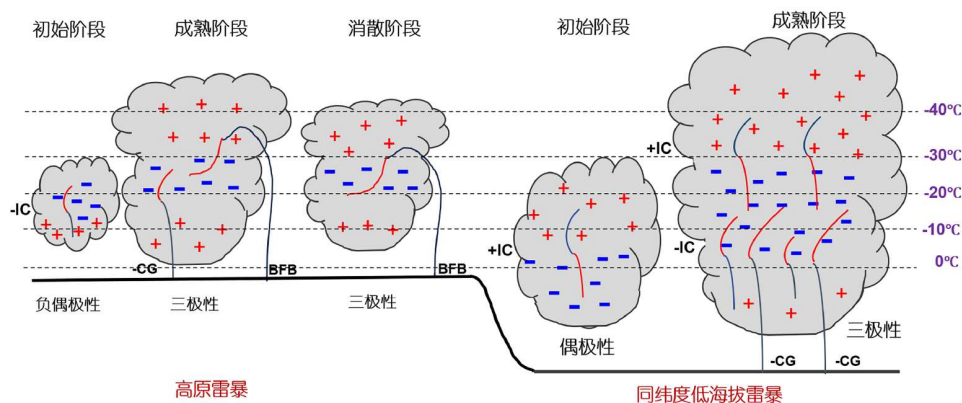


图5 高原雷暴电荷结构演化和闪电放电与同纬度低海拔地区对比示意图。BFB代表晴天霹雳闪电,红色“+”代表正电荷区域,蓝色“-”代表负电荷区域。红色曲线代表正极性闪电通道,蓝色曲线代表负极性闪电通道,黑色点线代表环境温度

Figure 5 Schematic diagram of evolution of the thunderstorm charge structure and lightning discharges in central Tibetan Plateau and low altitude region at the same latitude. BFB stands for bolt-from-the-blue lightning. Red “+” for positive charge region, and blue “-” for negative region. Red curves represent for positive lightning channels, blue curves for negative channels, and black dash lines for environmental temperature

致谢 感谢中国科学院青藏高原研究所和西藏气象局对观测实验的大力支持。

参考文献

- Ye D Z, Gao Y X. Meteorology of the Tibetan Plateau (in Chinese). Beijing: Science Press, 1979 [叶笃正, 高由禧. 青藏高原气象学. 北京: 科学出版社, 1979]
- Zhao Y, Wang Y, Xu X, et al. Effect of the Asian Water Tower over the Qinghai-Xizang Plateau and the characteristics of atmospheric water circulation (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2019, 64: 2830–2841 [徐祥德, 董李丽, 赵阳, 等. 青藏高原“亚洲水塔”效应和大气水分循环特征. 科学通报, 2019, 64: 2830–2841]
- Wu G X, He B, Liu Y, et al. Recent progresses on dynamics of the Tibetan Plateau and Asian Summer Monsoon (in Chinese). *Chin J Atmo Sci*, 2016, 40: 22–32 [吴国雄, 何编, 刘屹岷, 等. 青藏高原和亚洲夏季风动力学研究的新进展. 大气科学, 2016, 40: 22–32]
- Qie X S, Yuan T, Xie Y R, et al. Spatial and temporal distribution of lightning activities over the Tibetan Plateau. *Chin J Geophys*, 2004, 47: 997–1002 [郅秀书, 袁铁, 谢毅然, 等. 青藏高原闪电活动的时空分布特征. 地球物理学报, 2004, 47: 997–1002]
- Qie X, Wu X, Yuan T, et al. Comprehensive pattern of deep convective systems over the Tibetan Plateau–South Asian monsoon region based on TRMM data. *J Clim*, 2014, 27: 6612–6626
- Qie X, Qie K, Wei L, et al. Significantly increased lightning activity over the Tibetan Plateau and its relation to thunderstorm genesis. *Geophys Res Lett*, 2022, 49: e2022GL099894
- Zheng D, Zhang Y. New insights into the correlation between lightning flash rate and size in thunderstorms. *Geophys Res Lett*, 2021, 48: e2021GL096085
- Qie X, Zhang G, Kong X, et al. Observation on the summer lightning discharge in the northeastern verge of Qinghai-Xizang Plateau. *Plateau Meteorol*, 2003, 22: 209–216 [郅秀书, 张广庶, 孔祥贞, 等. 青藏高原东北部地区雷电特征的观测研究. 高原气象, 2003, 22: 209–216]
- Zhagn Y, Dong W, Zhao Y, et al. Study of charge structure and radiation characteristic of intracloud discharge in thunderstorms of Qinghai-Xizang Plateau. *Sci China Ser D-Earth Sci*, 2004, 47: 108–114
- Qie X, Kong X, Zhang G, et al. The possible charge structure of thunderstorm and lightning discharges in northeastern verge of Qinghai-Tibetan Plateau. *Atmos Res*, 2005, 76: 231–246
- Qie X, Zhang T, Chen C, et al. The lower positive charge center and its effect on lightning discharges on the Tibetan Plateau. *Geophys Res Lett*, 2005, 32: L05814
- Qie X, Zhang T, Zhang G, et al. Electrical characteristics of thunderstorms in different plateau regions of China. *Atmos Res*, 2009, 91: 244–249
- Zhao Z K, Qie X S, Zhang T L, et al. Electric field soundings and the charge structure within an isolated thunderstorm. *Chin Sci Bull*, 2009, 55: 872–876
- Liu D, Li F, Qie X, et al. Charge structure and lightning discharge in a thunderstorm over the central Tibetan Plateau. *Geophys Res Lett*, 2024, 51: e2024GL109602
- Li Y, Zhang G, Wang Y, et al. Observation and analysis of electrical structure change and diversity in thunderstorms on the Qinghai-Xizang Plateau. *Atmos Res*, 2017, 194: 130–141
- Li Y, Zhang G, Wen J, et al. Electrical structure of a Qinghai-Xizang Plateau thunderstorm based on three-dimensional lightning mapping. *Atmos Res*, 2013, 134: 137–149
- Qie X, Zhang Y. A review of atmospheric electricity research in China from 2011 to 2018. *Adv Atmos Sci*, 2019, 36: 994–1014
- Li Y, Zhang G, Zhang Y. Evolution of the charge structure and lightning discharge characteristics of a Qinghai-Xizang Plateau thunderstorm dominated by negative cloud-to-ground flashes. *JGR Atmos*, 2020, 125: e2019JD031129
- Wu B, Zhang G, Wen J, et al. Correlation analysis between initial preliminary breakdown process, the characteristic of radiation pulse, and the charge structure on the Qinghai-Tibetan Plateau. *J Geophys Res*, 2016, 121: 12434–12459
- Qie X, Kong X. Progression features of a stepped leader process with four grounded leader branches. *Geophys Res Lett*, 2007, 34: L06809
- Guo F, Zhang Y, Qie X, et al. Numerical simulation of different charge structures in thunderstorm. *Plateau Meteorol*, 2003, 22: 268–274 [郭凤霞, 张义军, 郅秀书, 等. 雷暴不同电结构形成原因模式研究. 高原气象, 2003, 22: 268–274]
- Wang F, Deng X, Zhang Y, et al. Numerical simulation of the formation of a large lower positive charge center in a Tibetan Plateau thunderstorm. *J Geophys Res*, 2019: 9561–9593
- Yin Q, Fan X, Zhang Y, et al. Analysis of a lightning strike fatality. *Acta Meteorol Sin*, 2019, 77: 292–302 [殷启元, 范祥鹏, 张义军, 等. 一次“晴天霹雳”致死事件分析. 气象学报, 2019, 77: 292–302]
- Harley J, Zimmerman L A, Edens H E, et al. High-speed spectra of a bolt from the blue lightning stepped leader. *JGR Atmos*, 2021, 126: e2020JD033884

- 25 Qie X S, L. yu W T, Sun Z L, et al. Thunderstorm and Lighting on the Tibetan Plateau (in Chinese). Beijing: Science Press, 2025 [鄯秀书, 吕伟涛, 孙竹玲, 等, 青藏高原的雷暴和闪电. 北京: 科学出版社, 2025]
- 26 Sun Z, Qie X, Liu M, et al. Lightning VHF radiation location system based on short-baseline TDOA technique — Validation in rocket-triggered lightning. *Atmos Res*, 2013, 129-130: 58–66
- 27 Li F, Sun Z, Liu M, et al. A new hybrid algorithm to image lightning channels combining the time difference of arrival technique and electromagnetic time reversal technique. *Remote Sens*, 2021, 13: 4658
- 28 Sun Z, Qie X, Liu M, et al. Characteristics of a negative lightning with multiple-ground terminations observed by a VHF lightning location system. *JGR Atmos*, 2016, 121: 413–426
- 29 Li F, Sun Z, Jiang R, et al. A rocket-triggered lightning flash containing negative-positive-negative current polarity reversal during its initial stage. *JGR Atmos*, 2021, 126: e2020JD033187
- 30 Yuan S, Qie X, Jiang R, et al. Lightning VHF radiation mapping method for an irregular short-baseline array. *Earth Space Sci*, 2023, 10: e2022EA002752
- 31 Shi T, Yang Y, Zheng Z, et al. Potential urban barrier effect to alter patterns of cloud-to-ground lightning in Beijing metropolis. *Geophys Res Lett*, 2022, 49: e2022GL100081
- 32 Thomas R J, Krehbiel P R, Rison W, et al. Observations of VHF source powers radiated by lightning. *Geophys Res Lett*, 2001, 28: 143–146
- 33 Williams E R. Problems in lightning physics—the role of polarity asymmetry. *Plasma Sources Sci Technol*, 2006, 15: S91–S108
- 34 Lhermitte R, Williams E. Thunderstorm electrification: a case study. *J Geophys Res*, 1985, 90: 6071–6078
- 35 Williams E, Mkrtchyan H, Mailyan B, et al. Radar diagnosis of the thundercloud electron accelerator. *JGR Atmos*, 2022, 127: e2021JD035957
- 36 Fuelberg H E, Walsh R J, Preston A D. The extension of lightning flashes from thunderstorms near Cape Canaveral, Florida. *JGR Atmos*, 2014, 119: 9965–9979
- 37 Takahashi T, Sugimoto S, Kawano T, et al. Microphysical structure and lightning initiation in Hokuriku winter clouds. *JGR Atmos*, 2019, 124: 13156–13181
- 38 Bruning E C, Rust W D, Schuur T J, et al. Electrical and polarimetric radar observations of a multicell storm in TELEX. *Mon Weather Rev*, 2007, 135: 2525–2544
- 39 Mansell E R, Ziegler C L, Bruning E C. Simulated electrification of a small thunderstorm with two-moment bulk microphysics. *J Atmos Sci*, 2010, 67: 171–194
- 40 Xu W. Thunderstorm climatologies and their relationships to total and extreme precipitation in China. *J Geophys Res*, 2020, 125: e2020JD033152
- 41 Qie X S, Yuan S F, Chen Z X, et al. Understanding the dynamical-microphysical-electrical processes associated with severe thunderstorms over the Beijing metropolitan region. *Sci China Earth Sci*, 2021, 64: 10–26 [鄯秀书, 袁善锋, 陈志雄, 等. 北京地区雷电灾害天气系统的动力-微物理-电过程观测研究. 中国科学: 地球科学, 2021, 51: 46–62]

Summary for “青藏高原单体雷暴的电荷结构及‘晴天霹雳’闪电成因”

Charge structure of an isolated thunderstorm on the Tibetan Plateau and the formation of bolt-from-the-blue lightning

Xiushu Qie^{1,2*}, Dongxia Liu¹, Fengquan Li³, Zhuling Sun¹, Lei Wei^{1,2}, Chunfa Sun^{1,2}, Kexin Zhu^{1,2}, Huimin Lü^{1,2}, Guoying Tang⁴, Shanfeng Yuan¹, Rubin Jiang¹ & Yu Wang³

¹ State Key Laboratory of Atmospheric Environment and Extreme Meteorology/Key Laboratory of Middle Atmosphere and Global Environment Observation (LAGEO), Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

² College of Earth and Planetary Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

³ Wuhan NARI Limited Liability Company, State Grid Electric Power Research Institute, Wuhan 430206, China

⁴ Institute of Heavy Rain, China Meteorological Administration, Wuhan 430205, China

* Corresponding author, E-mail: qie@mail.iap.ac.cn

The Qinghai-Tibetan Plateau is the highest in the world, and it is located in an area jointly influenced by the Indian monsoon and westerly winds. With its unique thermal and dynamic effects and complex topographical features, thunderstorms and convective activities occur frequently in the summer over most of the Plateau. The thunderstorm days in the central and eastern Plateau are similar to that of the southeastern coastal region with the most thunderstorm processes and lightning activities in China. However, the life cycle of thunderstorms over the Plateau is usually shorter, and their convective intensity is weaker, compared with those over prominently lower altitude regions. Thunderstorms over the Plateau not only show unique convective structures, but their electrical characteristics also differ significantly from those of thunderstorms over plain areas. Due to the difficulty of observation in the Plateau regions and the limitations in lightning detection technologies, it remains a challenge to understand the intercloud charge structure and lightning initiation of the thunderstorms over the main body of the Plateau region. By utilizing very high frequency (VHF) broadband interferometer lightning mapping technique, weather radar, and radio sounding, a thunderstorm process that produced two rare “bold-from-the-blue” flashes was observed in the Lhasa area located in the central Plateau. The mechanism of the “bold-from-the-blue” flashes was revealed through accurate mapping of the discharge processes in high spatial and temporal resolution, and the corresponding charge structure characteristics inside the thunderstorm were also retrieved. At the initial stage of the thunderstorm, it exhibited a negative dipole charge structure with an upper negative and bottom positive pattern, which is completely different from the evolution of charge structure in the thunderstorms over prominently lower altitude regions. When the thunderstorm developed into its mature stage, it exhibited a tripolar charge structure stacked with positive, negative, and positive charge regions from the top to bottom of the thunderstorm. These regions corresponded to environmental temperature zones below -30°C , from -30°C to -15°C , and above -10°C , respectively. The “bold-from-the-blue” flashes were associated with the upper dipole. The discharge originally initiated between the central negative and the upper positive charge region, with the positive leader developing downward to the lower negative charge region and the negative leader upward to the upper positive charge region. When the upward negative leader reached the upper positive charge region, it propagated horizontally and got out from the body of the small storm cell. The discharge ultimately became the “bold-from-the-blue” discharge process, spreading away from the cloud body into the clear sky area and striking the ground. The grounding points of the two “bold-from-the-blue” flashes were 3.6 and 3.8 km from the precipitation edge of the storm, respectively. The horizontal scale of the thunderstorm cell was relatively small with positive charge regions in both the upper and lower parts of the cloud. The unbalanced upper dipole in the smaller storm body, where the upper positive charge region was weaker than the lower negative charge region, was the main reason for triggering the “bolt-from-the-blue” flashes. This study not only sheds light on the mechanism of the rare “bold-from-the-blue” discharge process, but also provides direct observational evidence on the diversity of intercloud charge structure and lightning activity characteristics inside the thunderstorm over high-altitude regions.

Qinghai-Tibetan Plateau, thunderstorm charge structure, lightning flash, bolt-from-the-blue discharge, lightning mapping VHF interferometer

doi: [10.1360/TB-2024-1144](https://doi.org/10.1360/TB-2024-1144)