唐国瑛,李丰全,万蓉,等.2024. 2024年2月我国两次雨雪冰冻过程中闪电活动特征对比分析[J].暴雨灾害,43(4):479-489. TANG Guoying, LI Fengquan, WAN Rong, et al. Comparative analysis of lightning activity characteristics during two rainfall/snowfall and freezing events in China in February 2024 [J]. Torrential Rain and Disasters,43(4):479-489 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2024-082

2024年2月我国两次雨雪冰冻过程中闪电活动特征对比分析

唐国瑛[1],李丰全[2,3],万蓉[1],唐永兰[1],马莉[4],李山山[1]

(1. 中国气象局武汉暴雨研究所 暴雨监测预警湖北省重点实验室/中国气象局流域强降水重点开放实验室,武汉 430205;2. 国网电力科学研究院武汉南瑞有限责任公司 国家能源雷电灾害监测预警与安全防护重点实验室 电网雷击风险预防湖北省重点实验室,武汉 430206;3. 中国气象局龙卷风重点开放实验室,佛山 528000;4. 兰州中心气象台,兰州 730020)

摘　要: 2024年1月31日—2月5日和2月18—25日(以下分别简称为"0131"和"0218"过程)我国南方遭遇两次雨雪冰冻天气,并伴随密集的闪电发生。利用三维闪电定位数据、CLDAS-V2.0降水产品和Himawari-9号卫星红外云图资料,对比分析两次雨雪冰冻天气背景下的地闪时空分布、地闪回击数和雷电流累计概率分布特征,并研究了地闪与降水量及卫星黑体辐射亮温(TBB)间的关系。结果表明:(1) 两次过程中共监测到地闪数13万余次,正、负地闪分别为2万和11万余次;两次过程的地闪均具有夜发性,正地闪较总地闪和负地闪峰值滞后约1~2 h。两次过程中正地闪产生大电流的概率大于负地闪。(2) "0131"过程中地闪密度大值区出现在贵州南部及贵州、重庆、湖北三省交界处;"0218"过程中地闪密度大值区出现在湖北东部、江西北部、安徽、江苏和浙江大部。(3) "0131"过程中降水量和地闪的时空分布不一致,降水量峰值集中在白天,降水集中在湖南东南部、江西、安徽和江苏南部、浙江和福建大部;而"0218"过程中降水量和地闪的时空分布较一致,地闪出现的峰值较降水量峰值延迟2 h。(4) 两次过程中地闪的分布均很好地指示了对流区。地闪主要分布在对流云团发展方向的尾部且偏南处TBB变化梯度大的区域;对流合并会导致合并处地闪频数的跃增;对流发展最旺盛的冷云核心区几乎没有地闪发生。两次过程地闪密度随着TBB的增大呈现先增大后减小的变化特征。

关键词: 冬季闪电;雨雪冰冻;TBB;降水;Himawari-9号卫星

中图法分类号: P427.3　　**文献标志码:** A　　**DOI:** 10.12406/byzh.2024-082

Comparative analysis of lightning activity characteristics during two rainfall/snowfall and freezing events in China in February 2024

TANG Guoying[1], LI Fengquan[2,3], WAN Rong[1], Tang Yonglan[1], MA Li[4], LI Shanshan[1]

(1. *Institute of Heavy Rain, CMA, Hubei Key Laboratory for Heavy Rain Monitoring and Warning Research/China Meteorological Administration Basin Heavy Rainfall Key Laboratory, Wuhan* 430205; 2.*Wuhan NARI Limited Liability Company,State Grid Electric Power Research Institute, National Energy Key Laboratory of Lightning Disaster Detection, Early Warning and Safety Protection, Hubei Key Laboratory of Power Grid Lightning Risk Prevention, Wuhan* 430206; 3. *China Meteorological Administration Tornado Key Laboratory, Foshan* 528000; 4. *Lanzhou Central Meteorological Observatory, Lanzhou* 730020)

Abstract: Southern China encountered two rounds of rainfall/snowfall and freezing weather accompanied by intensive lightning flashes from January 31 to February 5 and February 18-25, 2024 (hereinafter referred to as "0131" and "0218" events, respectively). In this paper, three-dimensional lightning location data, CLDAS-V2.0 precipitation product, and infrared cloud image data of Himawari-9 satellite are used to analyze and compare the temporal and spatial distribution of cloud-to-ground (CG) flashes, the number of return strokes and the cumulative probability distribution of lightning current during these two events. The relationship between CG flashes with precipitation and sat-

收稿日期: 2024-05-08;**定稿日期:** 2024-07-12

资助项目: 湖北省自然科学基金创新发展联合基金项目(2022CFD124); 中国气象局龙卷风重点开放实验室开放课题(TKL202305); 国家自然科学基金项目(42105012); 中国气象局武汉暴雨研究所基本科研业务费专项基金项目(WHIHRKYYW2024)

第一作者: 唐国瑛,主要从事雷暴电学方面的研究。Email: tanggy0103@163.com

通信作者: 李丰全,主要从事雷电预警方面的研究。Email: lifengquan@mail.iap.ac.cn

© Editorial Office of *Torrential Rain and Disasters*. OA under CC BY-NC-ND 4.0

ellite blackbody brightness temperature (TBB) is also investigated. The results are as follows. (1) More than 130,000 CG lightning flashes were detected in the two events, with positive and negative CG lightning strokes being more than 20,000 and 110,000, respectively. The CG flashes of the two events showed a nocturnal pattern, with the peak of the positive CG distribution lagging behind the total CG flashes and negative CG flashes by about 1–2 h. The probability of large current events generated by positive CG flashes was greater than that of negative CG flashes. (2) In the "0131" event, the large value of CG flash density appeared in the southern part of Guizhou and the junction of Guizhou, Chongqing, and Hubei provinces; In the "0218" event, the large value of CG density occurred in the eastern part of Hubei, the northern part of Jiangxi, Anhui, Jiangsu and most of Zhejiang. (3) The spatial and temporal distribution of precipitation and CG flashes during the "0131" event was inconsistent. The peak precipitation was concentrated in the daytime, with the precipitation mainly appearing in southeastern Hunan, Jiangxi, Anhui, and southern Jiangsu, and most of Zhejiang and Fujian. During the "0218" event, the spatial and temporal distribution of precipitation and CG flashes were consistent, with the peak of CG flashes being 2 h later than the peak of precipitation. (4) In both events, the distribution of CG flashes well indicated the convection regions. The CG flashes were mainly distributed in the southern tail of the convective cloud cluster, where the TBB gradient was large. Convective merging may lead to a jump in the frequency of CG flashes at the merging area. Almost no CG flashes were detected in the core of the cold clouds, where convection developed most vigorously. The CG flash density in both events increased first and then decreased with the increase of TBB.

Key words: winter lightning; rain, snow and freezing; TBB; precipitation; Himawari-9

引 言

2024年2月,受南支槽和北支槽叠加影响,西南暖湿气流北上与来自中高纬度的冷空气共同作用,在2024年1月31日—2月7日(以下简称“0131过程”)和2月18—23日(以下简称“0218过程”)期间给我国南方大部分区域带来了两次雨雪冰冻过程。两次过程期间伴随着密集的闪电发生并引发一定灾害,例如2024年2月1日01时左右,江苏常熟虞山街道附近一民房遭雷击后起火,给人民带来了财产损失。目前对低温雨雪冰冻天气的研究大多聚焦在天气背景、成因、机理研究等方面(丁一汇等,2008;吴古会等,2012;刘红武等,2020),较少关注此类过程中闪电活动特征。而闪电是雷暴天气的一个重要表现形式,通过对闪电活动的研究,可加深对雷暴天气的认识(Qie et al.,2014;方俏娴等,2023)。

近年来随着探测技术的发展,国内外已有大量关于闪电时空特征的研究(Holle,2014;王娟和谌芸,2015;Qie et al.,2021;Xu et al.,2022)。总体上,我国大陆地闪(cloud-to-ground flash, CG flash)的分布特征整体表现为夏季多、冬季少,多发于下午至傍晚,地闪密度年平均高值区主要位于华南、江南和四川盆地(Yang et al.,2015)。但受局地气候背景、下垫面等影响,不同区域的闪电活动特征也有所不同,例如王学良等(2017)指出湖北省7 a冬季闪电少且主要发生在夜间,1月和12月平均正地闪占总闪比例在30%以上。吴安坤等(2017)利用ADTD (Advanced Direction and Time of arrival Detecting system)资料对贵州近10 a冬季地闪时空分布特征的分析指出,地闪集中在中部至东北一线,夜间(20:00—次日07:00)地闪频数占日间频数的58.64%,并且正地闪更易发生在夜间。贺秋艳等(2019)利用2008—2017年ADTD闪电监测定位数据,得到湖南地闪密度空间分布总体呈湘北多于湘南、湘西多于湘东的特征。Yang等(2020)指出我国长三角地区梅雨期间地闪呈单峰型特征,即地闪以午后为高峰,其发生与负地闪的平均峰值电流呈显著负相关,且负地闪的平均峰值电流日变化与风暴强度的日变化基本一致。以上研究主要针对年尺度数据结果下地闪年平均时空分布特征或夏季闪电的分布特征。而冬季闪电的发生频次较低,对其活动特征方面的认识还有所不足。

目前针对我国冬季闪电空间分布特征的有限研究中,Xu等(2022)指出冬季“雷打雪”主要分布在长江三角洲和环渤海地区。王娟和谌芸(2015)、Xia等(2015)研究表明我国冬季地闪主要发生在长江下游流域,Ma等(2022)对2010—2020年冬季地闪密度的空间分布研究表明,我国冬季闪电三个高发区分别位于云贵高原西南侧、云贵高原东侧和鄱阳湖平原,且多发于夜间。通过上述结果发现,在王娟和谌芸(2015)和Ma等(2022)的研究结果中,冬季闪电的集中区域并不一致,且上述研究未对闪电的电流分布、回击次数等特性进行研究。因此有必要对冬季闪电活动特征进行进一步的探讨。本文以2024年1月31日—2月7日和2月18—23日两次雨雪冰冻天气过程为例,利用三维闪电定位数据、CLDAS-V2.0降水产品和Himawari-9号卫星红外云图资料,对比分析两次过程中地闪的时空分布和回击、雷电流分布特征,并研究地闪与降水量及黑体辐射亮温(Black Body Temperature,TBB)间的关系,以期从不同角度提供两次低温雨雪冰冻天气过程的特征信息,为冬季闪电预警和防灾减灾提供科学依据。

1 资料和方法

本文使用的资料时段均为2024年1月31日—2月5日和2月18—25日,研究区域为(86°—135°E,15°—40°N),主要包括:(1) 中国气象局“天擎”数据平台提供

的三维闪电定位数据，其探测效率可达90%以上，探测范围平均约300 km，定位误差小于500 m，探测数据包括地闪发生的时间(精确到秒)、地点(经、纬度)、回击电流极性和峰值强度等雷电参数。根据观测经验，闪电定位资料中小于10 kA的正地闪可能是云闪误测导致，因此统计过程中剔除了回击峰值强度小于10 kA的正地闪数据；同时剔除了电流强度和陡度为0 kA、高度大于0或者标识为云闪的数据、雷电流绝对值大于500 kA的数据和定位方式为两站的闪电数据。(2) 国家气象科学数据中心提供的中国陆面数值同化系统(CLDAS-V2.0)的近实时降水产品，时空分辨率分别为1 h和0.062 5°×0.062 5°。(3) 日本气象厅提供的Himawari-9号静止卫星TBB资料(https://www.eorc.jaxa.jp/ptree/)，采用红外通道13 (中心波长为10.4μm)的NETCDF格式数据，时空分辨率分别为10 min和0.05°×0.05°。

本文首先利用闪电定位数据对两次过程影响时间和区域内的闪电的时空分布、地闪的回击次数及雷电流的概率密度进行对比分析；其次基于CLDAS-V2.0产品分析两次过程的降水量时空分布，并研究地闪与降水量之间的关系；最后利用卫星TBB反映云顶高度，探讨TBB与地闪间的关系。

2 地闪时空分布和雷电参数特征分析

2.1 地闪时空分布特征

两次过程中共监测到地闪数13万余次，其中正地闪回击2万余次，负地闪11万余次，正地闪约占总地闪数的15%。“0131”过程地闪、正地闪、负地闪分别发生约1.7万次、0.5万次和1.2万次，正地闪约占地闪数的29%；“0218”过程地闪、正地闪、负地闪分别发生12万余次、1.6万次和10.5万次，正地闪约占地闪数的13%。可见，两次过程的正地闪占地闪总数均高于夏季(10%) (王娟和谌芸，2015)，说明冬季正地闪占较高。关于冬季正地闪占比较高的原因，早期学者(Brook et al.，1982)普遍认为由于冬季较强的风切变，导致雷暴云中偶极电荷结构发生倾斜，使得上部的正极性电荷较易对地发生放电，但近几年也有学者认为日本冬季正地闪比例较高可能是由于雷暴云中电荷极性反转引起的，在近地面形成一个负电荷区，为正地闪的形成提供条件(Kuhlman et al.，2006)。Zheng等(2019)通过分析日本北陆三个冬季雷暴中电荷的分布，证实了这种反偶极子的电荷结构。

两次过程中均有较明显的闪电活动峰值，分别出现在2月2—4日和2月20—22日(图1a、c)。从逐时演变特征(图1b、d)看，“0131”过程地闪和负地闪频数峰值出现在22:00—23:00 (北京时，下同)和次日02:00—03:00，正地闪峰值则出现在24:00—次日01:00和03:00—04:00；而“0218”过程地闪频数峰值出现在23:00—24:00，正地闪峰值则出现在次日01:00左右，两次过程正地闪峰值较总地闪和负地闪峰值均滞后1~2 h。两次过程闪电均具有夜发性，正如Xu等(2022)和Ma等(2022)发现的一样，冬季闪电通常由夜间雷暴产生。这可能是由于在夜间高层云存在

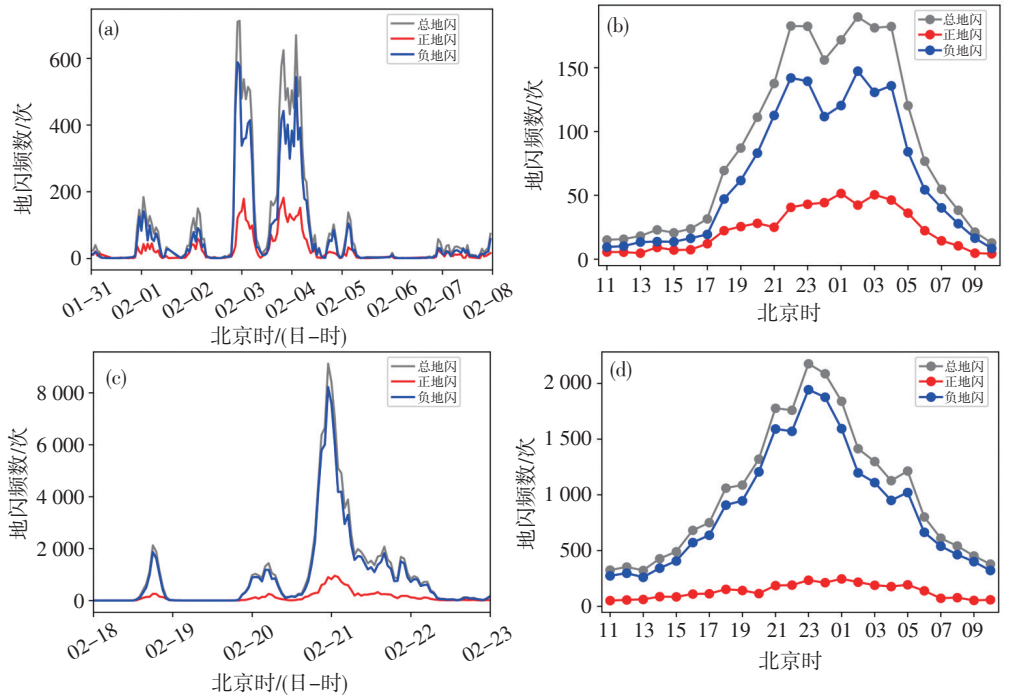


图1 2024年“0131”过程(a、b)和“0218”过程(c、d)中总地闪、正地闪和负地闪数逐日(a、c)和逐时(b、d)变化

Fig. 1 The (a, c) daily and (b, d) hourly number of CG, positive CG and negative CG flashes during the (a, b) “0131” event and (c, d) “0218” event in 2024

明显的辐射降温,因此与低层暖湿空气之间形成热力不稳定。此外,若高低空存在急流,则低空急流出口处和高空急流入口处耦合作用产生次级环流,其上升支将激发形成对流(盛杰等,2014),从而增加夜间雷电发生的概率。而正地闪峰值在时间上有滞后现象,这可能与正地闪在雷暴消散期出现的比例较高有关(唐国瑛等,2022)。

地闪密度是指某区域每平方公里每年地闪次数,是计算雷击风险,进行防雷减灾设计的重要参考依据。图2为两次过程地闪密度空间分布,两次过程的地闪分布空间有所不同。“0131”过程中地闪主要集中在贵州中南部、湖南北部和西部、湖北西部和南部、重庆南部;地闪密度大值区(大于0.2次·km^2)集中在贵州南部及湖南、重庆、湖北三省交界的区域(图2a、c)。“0218”过程中地闪主要分布在湖北中东部、江西北部、安徽、江苏和浙江大部(图2b、d),地闪密度大值区主要分布在湖北东部、江西北部、安徽南部和江苏中部偏南处,其中池州、宣城、九江、上饶、南京、扬州、泰州和盐城市出现了地闪密度较高(大于0.5次·km^2)。两次过程中正地闪密度整体的空间分布与负地闪较一致,但地闪密度远小于负地闪,大部分在0.2次·km^{2}以下(图2e、f)。

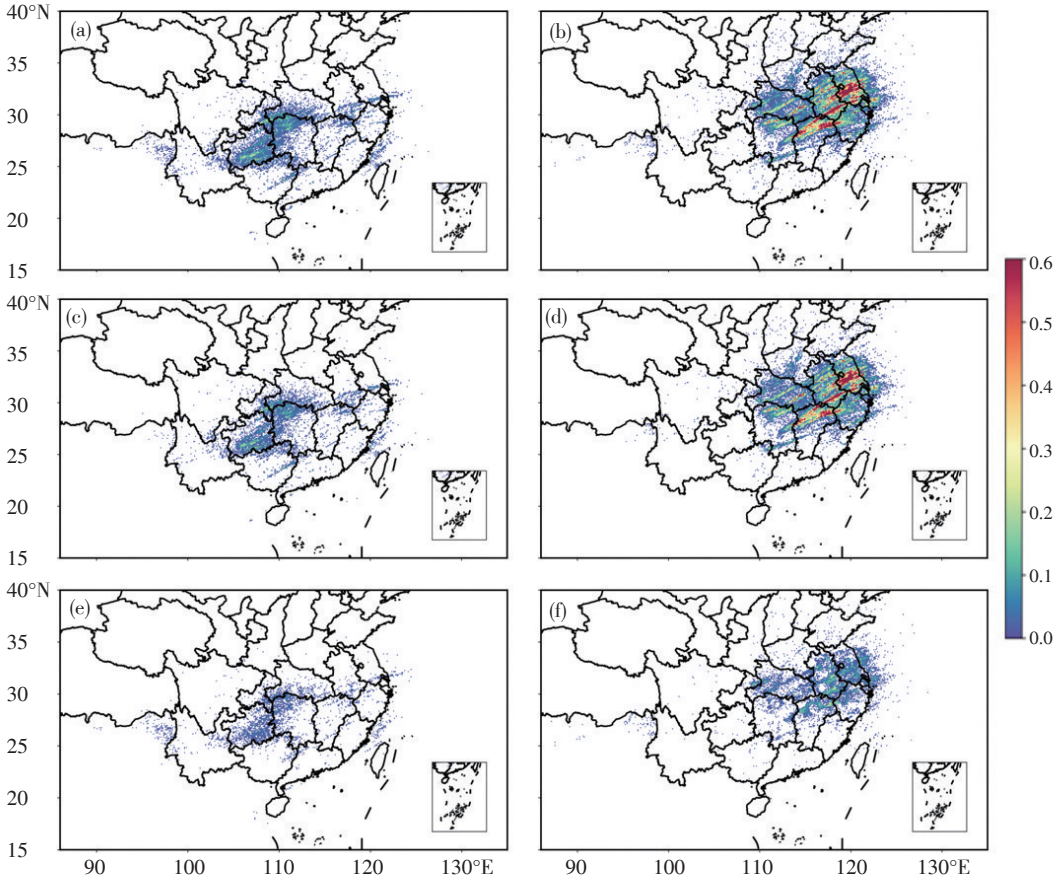


图2 2024年“0131”过程(a,c,e)、“0218”过程(b,d,f)地闪(a、b)、负地闪(c,d)和正地闪(e,f)地闪密度(单位:次·km^2)空间分布

Fig. 2 The spatial distribution of CG flash density (unit: number·km^2) of (a, b) CG flashes, (c, d) negative CG flashes and (e, f) positive CG flashes during the (a, c, e) “0131” event and (b, d, f) “0218” event in 2024

王娟和谌芸(2015)及Ma等(2022)的研究结果中冬季闪电的集中区域有所差异。其中王娟和谌芸(2015)指出2009—2012年江浙和安徽东南部及江西北部为全国冬季闪电高发区,通过对比发现“0218”过程的地闪空间分布区域与上述研究结果大致重合,但“0218”过程湖南北部和贵州东部地闪发生较少。而“0131”过程则与Ma等(2022) 2010—2020年的统计结论更为接近,但“0131”过程中贵州西南部的地闪频数更多,云南中东部几乎没有出现地闪。

2.2 地闪回击及雷电流分布特征

雷暴云中的闪电先导通道接地后会形成首次回击过程,首次回击结束后,云中仍会有一些放电过程,可能会形成继后回击(郄秀书等,2013;Sun et al.,2016)。有研究指出,多回击地闪对击中物体作用时间较长,破坏性更大(曾金全等,2017)。图3为两次过程中正、负地闪回击数及回击数累计概率统计,可见正地闪大多数只有一次回击,占到了正地闪数的90%以上,1~2次的累计概率达到95% (图3a、c)。而负地闪首次回击概率只有60%~80%左右,90%的负地闪有3次以上的回击,甚至可达9次(图3b、d)。

上述提到先导接地后会形成回击过程,雷暴云与大地之间聚集的大量电荷会通过回击通道发生猛烈

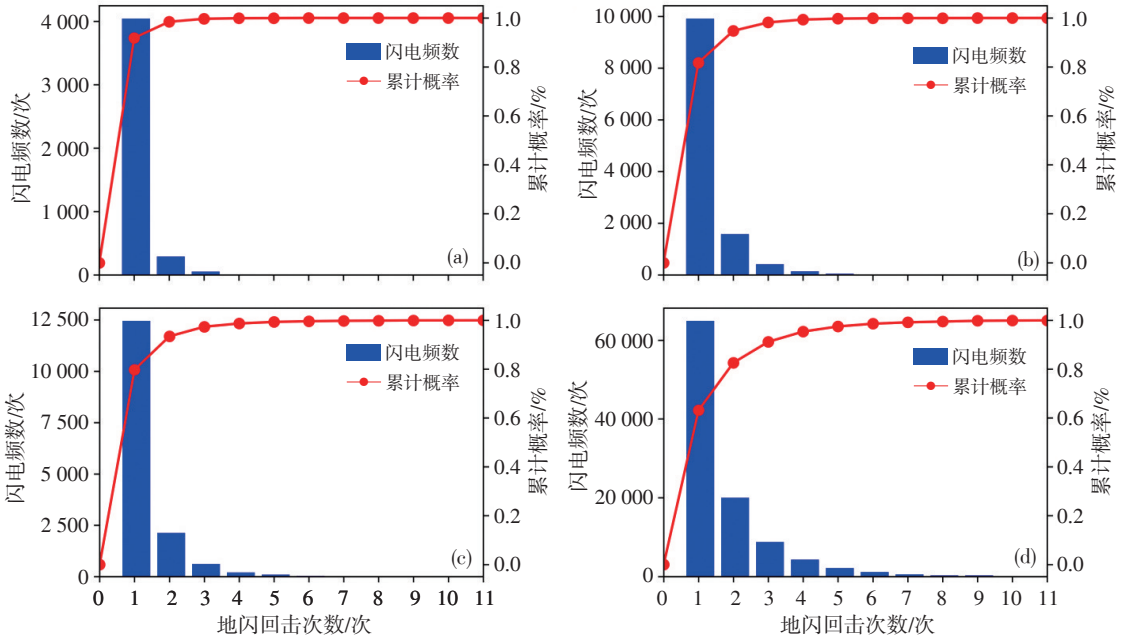


图3 2024年“0131”过程(a、b)、“0218”过程(c、d)正地闪(a、c)和负地闪(b、d)回击数和回击数累计概率分布

Fig. 3 The return stroke numbers of (a, c) positive CG flashes, (b, d) negative CG flashes and cumulative probability statistics during the (a, b) “0131” event and (c, d) “0218” event in 2024

的电荷中和，形成大电流，产生巨大危害，统计雷电流的累积概率可为精确计算雷击建筑物损失风险提供参考。图4为两次过程中正、负地闪雷电流和雷电流累计概率统计，可见两次过程中正、负地闪雷电流集中在10~30 kA，正地闪回击电流超过100 kA的概率约为5% (图4a、c)，负地闪超过75 kA的概率不足5% (图4b、d)，正地闪出现大电流的概率大于负地闪。

通过以上分析发现，两次过程中产生的正地闪所占比例普遍较高，正地闪产生大电流的概率大于负地闪；结合前人研究结果可知，不论冬季还是夏季闪电，正地闪回击电流的峰值电流和脉冲宽度均较负地闪要大(Yuan et al.，2020；Tang et al.，2023)，这意味着正地闪破坏性可能更强，而近年来中国陆地的正地闪整体呈上升趋势(徐鸣一，2022)，因此雷电防护方面也应重视对正地闪监测和防护。

3 地闪数与降水量的关系

利用CLDAS-V2.0小时降水产品绘制了两次过程

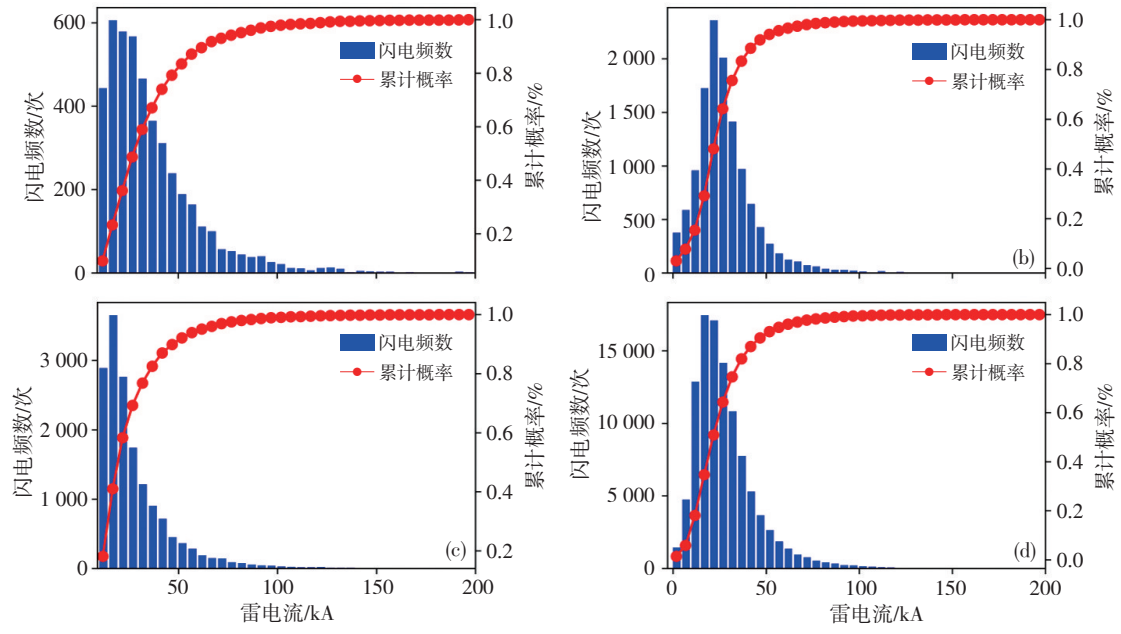


图4 同图3，但为雷电流和雷电流累计概率统计

Fig. 4 Same as Fig.3, but for the lightning current and cumulative probability statistics of flashes

中降水量逐日(图5a、c)、逐时(图5b、d)分布和空间(图6a、b)分布。通过对比图1a、c和图5a、c,发现“0131”过程中地闪和降水的日变化并不一致,在2月1—3日,降水峰值均出现在夜间,这与地闪在同一时间的日变化峰值一致,但2月4日降水峰值出现在白天,而且量级比前3 d大,因此导致“0131”过程中降水峰值由夜间移至白天(图5b)。

“0131”过程中,地闪和降水的不一致性还体现在空间上,对比图2a和图6a,第一次过程中降水量大于25 mm的主要集中在湖南的东南部、江西、安徽南部、浙江大部和江苏南部,而“0131”过程的地闪则大致集中在图6a中的红框处。究其原因,一可能是与天气背景有关系,二是因为这只是两次简短的过程,如果想深入研究闪电与降水的关系,可能还需要长时间序列的数据来支撑。受地理位置、云中物理参数、电荷结构多种因素影响,不同过程的闪电与降水关系有一定差异。

“0218”过程的降水量和地闪的时空分布较为一致。对比图1c和图5c可见,降水量和地闪峰值均集中在2月18日、20日和21日;由逐时演变特征来看,“0218”过程降水量峰值出现在21:00—22:00 (图5d),地闪峰值出现在23:00—24:00,地闪的出现峰值较降水量的峰值有2 h的延后。对比图2b和图6b可见,“0218”过程地闪与降水量有较好的空间一致性。

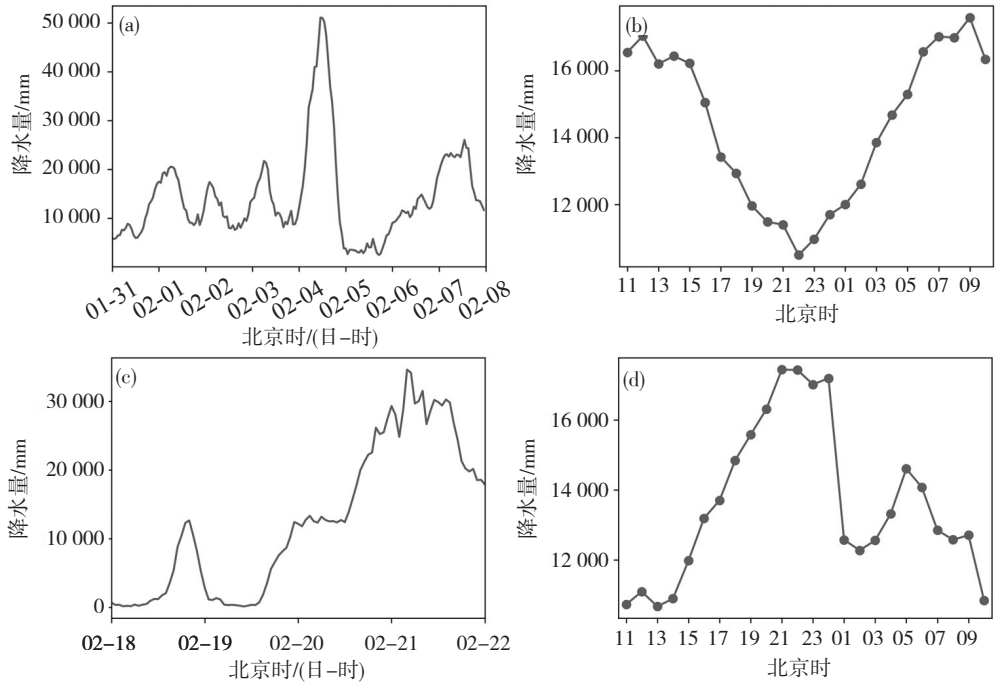


图5 2024年“0131”过程(a、b)和“0218”过程(c、d)降水量逐日(a、c)和逐时(b、d)演变特征

Fig. 5 The (a, c) daily and (b, d) hourly variation characteristics of precipitation during the (a, b) “0131” event and (c, d) “0218” event in 2024

4 卫星黑体辐射亮温(TBB)与闪电的空间分布关系

红外云图能反映对流云发展高度和云顶形态结构特征,利用Himawari-9号红外云图中TBB叠加地闪定位结果,可以直观地看出强对流天气发展过程中对流云团和地闪发生发展的关系(马瑞阳等,2021)。下文根据图1a、c挑选出三次地闪频数较多的时间段,分析对流云团发生发展的不同阶段闪电与TBB间的对应关系。

4.1 2月2日晚渝湘鄂交界处的闪电与TBB

根据图1a,2024年2月2日晚至2月3日清晨,地闪频数呈峰值特征。图7为2月2日20:10—3日07:00卫星TBB和对应10 min地闪叠加。分析可知,20:10在重庆南部有弱对流云系生成,在其东侧产生了零星的负地闪(图7a),随后云系向东北方向发展;21:00,对流云团轮廓逐渐变得清晰,发展最旺盛区域的TBB约–40 ℃,地闪逐渐变多,主要分布在对流云发展方向的前侧和南侧,此时湖北省西部受对流过程影响也产生闪电(图7b);22:00,对流云团已大部分进入湖北省内恩施州,此时雷暴云系轮廓鲜明,冷云核心TBB已不高于–45 ℃,地闪主要为负地闪,发生在TBB约为–45~–35 ℃过渡的地带,集中分布在重庆东部和湖北省西部(图7c);23:00,对流云团进一步发展,冷云面积向南北两侧扩大,水平尺度达到300 km,TBB不高于–40 ℃的区域明显变大,此时地闪主要仍然集中在TBB约为–45~–35 ℃过渡的云系前方和南部,同时在对流云团的东南方(湖南省西北部)有小的对流云系产生地闪(图7d);2月3日00:00,对流云团发展头部面积

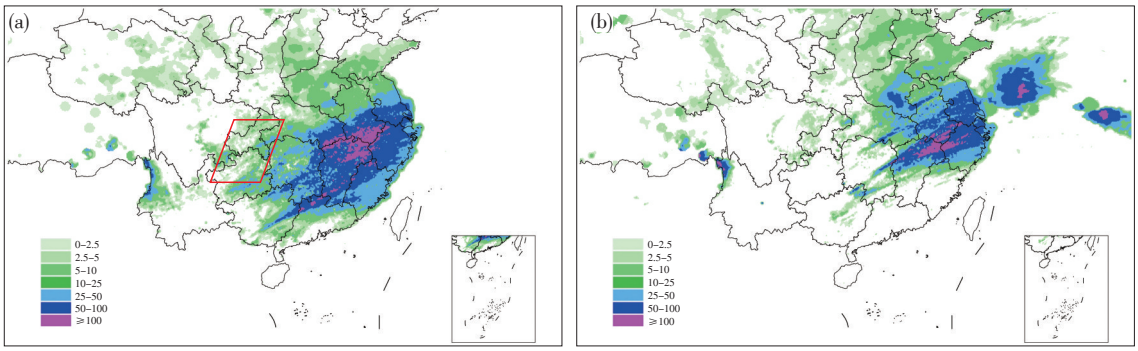


图6 2024年“0131”过程(a)、“0218”过程(b)降水量(单位: mm)空间分布(图a中红框代表“0131”过程地闪集中处)

Fig. 6 The spatial distribution of precipitation (unit: mm) during the (a) “0131” event and (b) “0218” event in 2024 (The red box in Fig.6a represents the peak area of the CG flashes in "0131" event)

增大，地闪比较密集，正地闪的数量也逐渐增多(图7e)，在对流云团后部，发展出新生对流云体，新的对流云体的南部也有许多负地闪发生；01∶00，新生的对流云体逐渐发展成熟，地闪主要集中在对应的湖北西南部和湖南西北部交界处，而对流云团头部冷云核心逐渐分散，地闪也逐渐减少(图7f)；对流云团进一步东移北上，02∶00在湖南西北方向有零星对流云系生成(图7g)，并不断发展、合并，形成细长型云系；03∶00—05∶00，在细长型云系南部对应的湖南北部和湖北东部产生闪电带(图7h—j)；06∶00—07∶00，随着云系进一步东移，冷云核心区逐渐分散，地闪逐渐减少(图7k、l)。

4.2 2月3日晚发生在贵州的闪电与TBB

2024年2月3日中午至2月4日清晨，“0131”过程中地闪频数达到最大峰值。图8为2月3日11∶10—4日06∶00卫星TBB和对应10 min地闪叠加，可见11∶10开始，在云南北部有零星的弱对流云系发展，面积较小，形状不规则，TBB约为−25℃，偶有零星地闪发生。随后地闪伴随着对流云系向东北方向发展；随着对流云系的进一步发展，13∶50云南、贵州、湖南局部区域TBB已发展至不高于−30℃，在这些对流区域产生了正、负不同极性的地闪(图8a—c)；15∶00对流云团主要发生在两处，一处为贵州省西部、另一处为贵州省东北部和湖南西北部交界处，后者发展较为旺

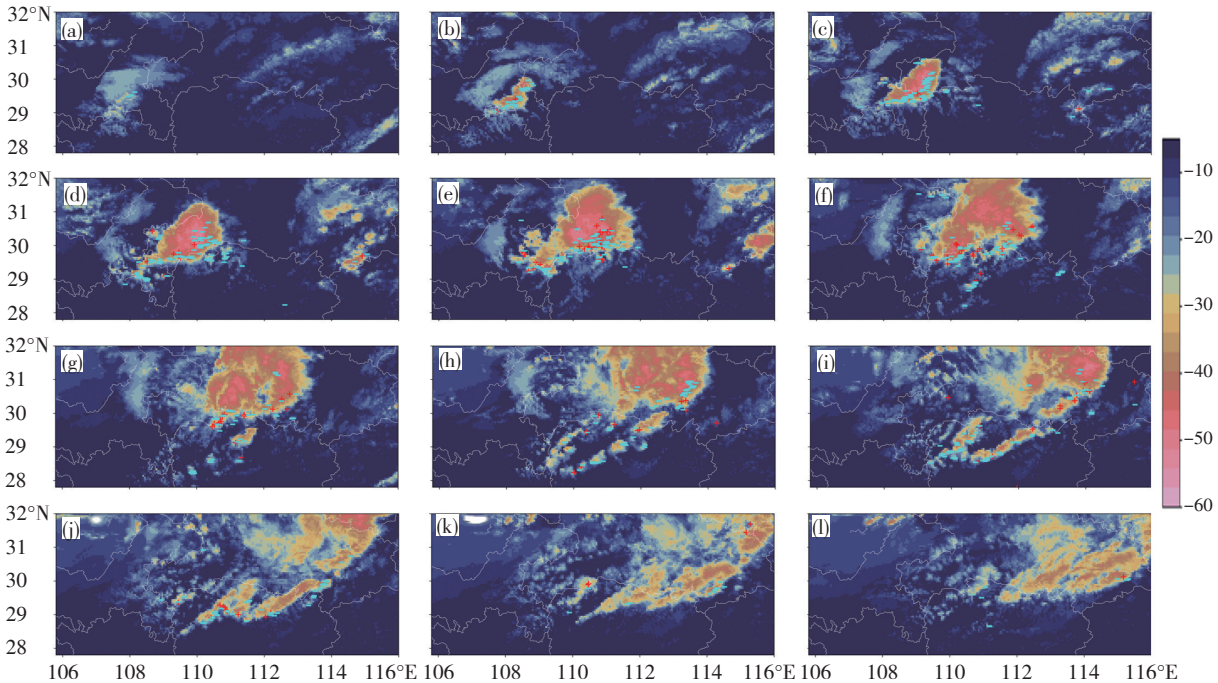


图7 2024年2月2日20∶10 (a)、21∶00 (b)、22∶00 (c)、23∶00 (d)、3日00∶00 (e)、01∶00 (f)、02∶00 (g)、03∶00 (h)、04∶00 (i)、05∶00 (g)、06∶00 (k)和06∶50 (l)卫星TBB(填色，单位: ℃)和对应10 min地闪叠加(红色“+”和蓝色“−”分别表示正、负地闪发生位置，下同)

Fig. 7 The superposition of the satellite TBB (color-filled, unit: ℃) and corresponding CG flashes in the 10 min window at (a) 20∶10 BT, (b) 21∶00 BT, (c) 22∶00 BT, (d) 23∶00 BT on February 2, and (e) 00∶00 BT, (f) 01∶00 BT, (g) 02∶00 BT, (h) 03∶00 BT, (i) 04∶00 BT, (g) 05∶00 BT, (k) 06∶00 BT, (l) 06∶50 BT on February 3, 2024 (red "+" and blue "−" represent the positive and negative CG flashes respectively, hereinafter)

盛，TBB不高于-40 ℃ (图8d)。16∶10由云南北部发展而来的对流云系向东北方向移动过程中进一步发展并伴随地闪发生(图8e)；17∶30云系在贵州省中南部快速发展为横跨至少4个经距的细长对流云团(图8f)；18∶50对流云团TBB不高于-45 ℃的云覆盖范围更大，相应地，地闪发生位置横跨贵州省和湖南省，多发生在对流云团发展方向的南部，TBB由-45 ℃向-35 ℃过渡的地方，呈西南—东北的细长条形分布(图8g)；20∶00—21∶00由贵州北部发展起来的对流云团与该云团的发展头部合并，可见在对流合并处产生了一些密集的地闪过程，随后合并后的对流云团进一步向东北方向移动进入湖南北部(图8h、i)。22∶30后，对流云团呈逗号形态，地闪主要分布在对流云团的尾部，即贵州南部，虽然此时对流云团的头部冷云面积变大，轮廓变得清晰，冷云核心TBB均较低，但较少地闪产生(图8j—m)；4日03∶30后，对流云团逐渐衰退，分解为多个对流单体，地闪也随之减少(图8n—p)。

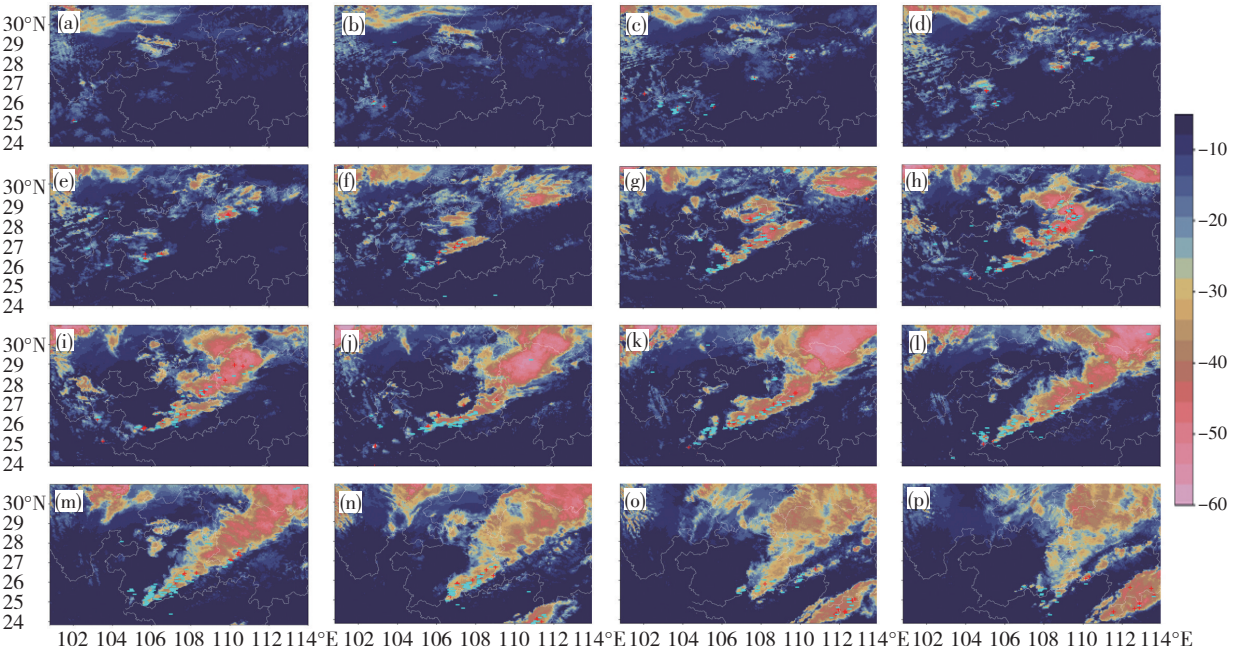


图8 2024年2月3日11∶10 (a)、12∶30 (b)、13∶50 (c)、15∶00 (d)、16∶10 (e)、17∶30 (f)、18∶50 (g)、20∶00 (h)、21∶10 (i)、22∶30 (g)、23∶50 (k)、4日01∶00 (l)、02∶10 (m)、03∶30 (n)、04∶50 (o)、06∶00 (p)卫星TBB(填色，单位：℃)和对应10 min地闪叠加

Fig. 8 The superposition of the satellite TBB (color-filled, unit: ℃) and corresponding CG flashes in the 10 min window at (a) 11∶10 BT, (b) 12∶30 BT, (c) 13∶50 BT, (d) 15∶00 BT, (e) 16∶10 BT, (f) 17∶30 BT, (g) 18∶50 BT, (h) 20∶00 BT, (i)21∶10 BT, (g) 22∶30 BT, (k) 23∶50 BT on February 3, and (l) 01∶00 BT, (m) 02∶00 BT, (n) 03∶30 BT, (o) 04∶50 BT, (p) 06∶00 BT on February 4, 2024

4.3 2月21日晚发生在江浙一带的闪电与TBB

“0218”过程中，闪电活动从2月19日20∶30左右随着对流云的触发，率先在湖北省荆州市南部发展起来。随后对流云团面积逐渐增大并逐步向东北方向移动，地闪主要分布在对流云后方偏南处，TBB约-40 ℃向-50 ℃发展的过渡带；随着对流云团的发展和移动，地闪对应的主要出现在湖北西南、安徽中部、江苏中南部(图略)。至20日10∶30左右，此前的对流云团已经移动出江苏东部沿海，随后在湖北西北部和河南南部交界处又快速发展出一对流云团，至12∶40，对流云团已经发展成横跨6个经度的云团，地闪主要分布在对流合并处，多为负地闪(图略)；而随着对流云团向东北方向移动，在其发展后方，即安徽省大部地区又发展出了许多细长型的对流单体，地闪多发生在对流单体发展的尾部和南部，TBB温度梯度变化较大的地方。而更为密集的地闪过程出现在2月20日23∶00—21日01∶30(图9)，可见23∶00—23∶30(图9a—c)，在湖北中部、江西北部、安徽和江苏大部分布着大量对流云团，此阶段的对流云较为分散，形状不规则，冷云核心TBB均不高于-50 ℃；21日00∶00—01∶00，冷云核心区逐渐合并，面积更为规则，而地闪活动随着对流云团的变化在温度梯度变化区域也变得非常密集，地闪主要分布在湖北中部、江苏北部、安徽南部和江苏中南部(图9d—f)；01∶10后，对流云团已经完成了合并，冷云核心面积已不高于-60 ℃，此时冷云核心区的地闪活动逐渐减少(图9g—i)。

4.4 卫星TBB与地闪密度间的关系

为更好研究地闪发生与TBB的关系，分别取出“0131”和“0218”两次过程所有时次中地闪密度大于0的网格，并将网格上地闪密度与对应的TBB进行相关

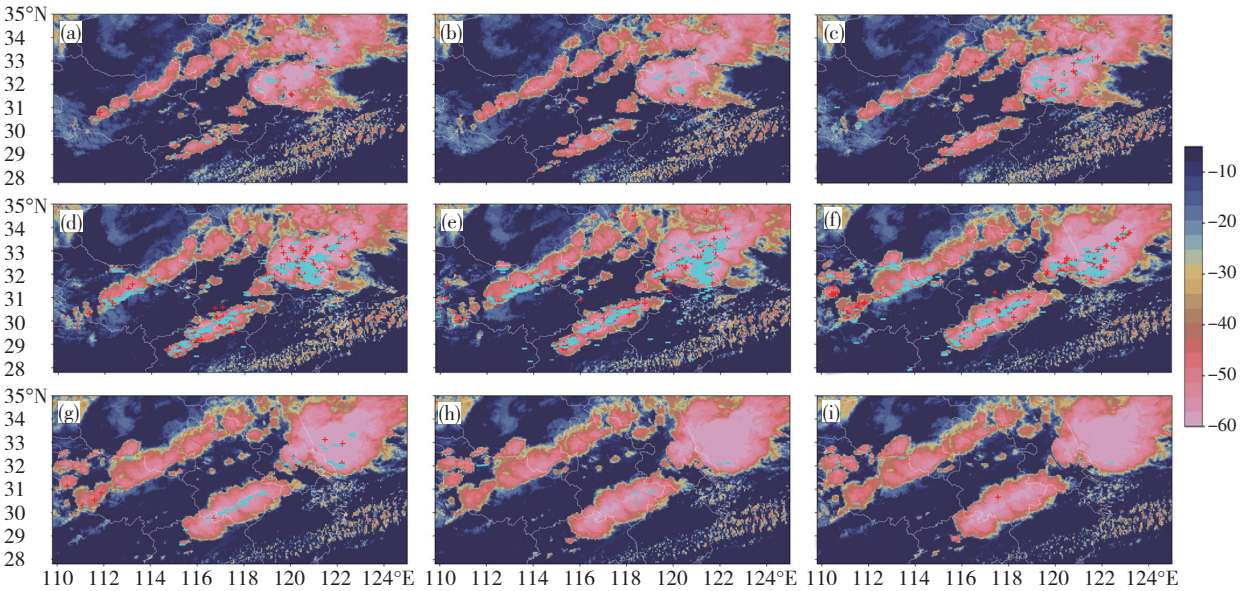


图9 2024年2月20日23:00 (a)、23:20 (b)、23:30 (c)、21日00:00 (d)、00:20 (e)、01:00 (f)、01:10 (g)、01:20 (h)、01:30 (i)卫星TBB(填色, 单位: ℃)和对应10 min地闪叠加

Fig. 9 The superposition of the satellite TBB (color-filled, unit: ℃) and corresponding CG flashes in the 10 min window at (a) 23:00 BT, (b) 23:20 BT, (c) 23:30 BT on February 20, and (d) 00:00 BT, (e) 00:20 BT, (f) 01:00 BT, (g) 01:10 BT, (h) 01:20 BT, (i) 01:30 BT on February 21, 2024

性统计(图10),总体上两次过程地闪密度随着对应网格上TBB的增大呈现先增大后减小的变化特征。"0131"过程地闪和负地闪密度的TBB集中在−35 ℃左右(图10a、c),而"0218"过程的负地闪与地闪密度均集

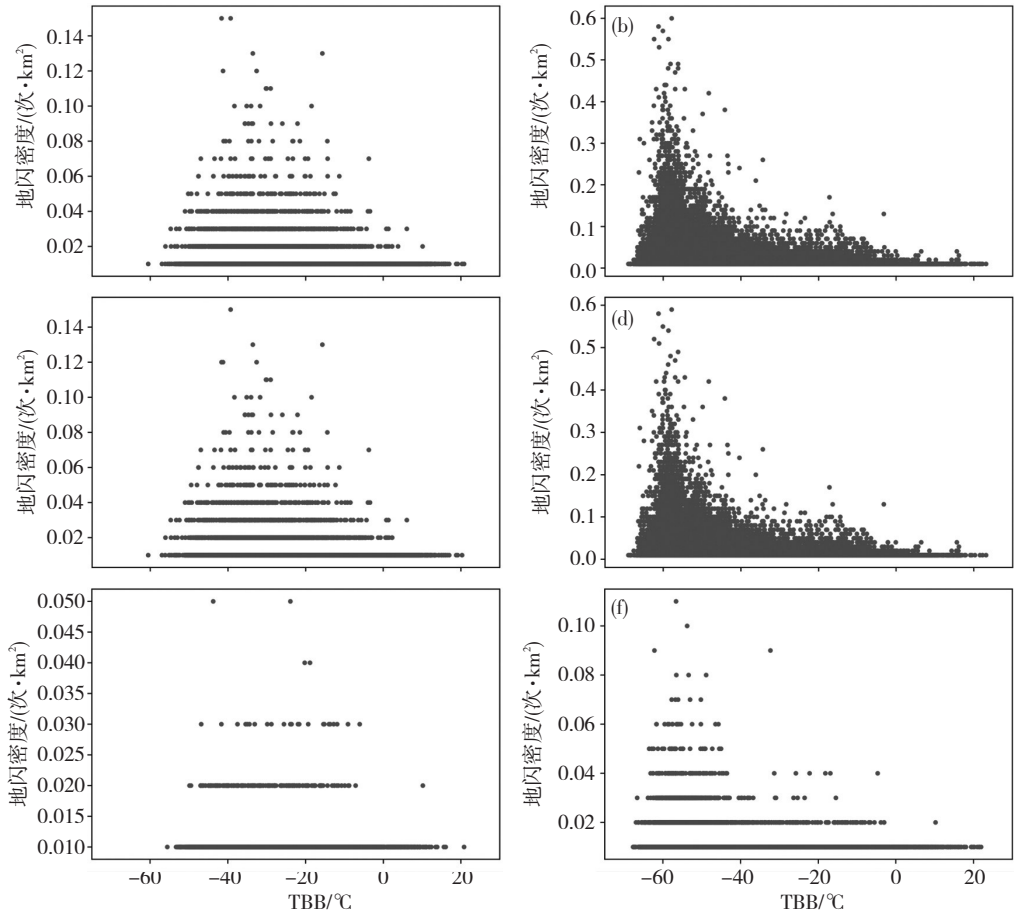


图10 2024年"0131"过程(a,c,e)、"0218"过程(b,d,f)卫星TBB和地闪(a、b)、负地闪(c,d)和正地闪(e,f)密度分布

Fig. 10 The distribution of (a, b) CG flashes, (c, d) negative CG flashes and (e, f) positive CG flashes density and TBB during the (a, c, e) "0131" event and (b, d, f) "0218" event

中在-58 ℃左右(图10b、d)。而“0131”和“0218”过程的正地闪TBB分别集中在约-30 ℃和-50 ℃(图10e、f),较负地闪密度的TBB高约-5~-8 ℃。

综上,地闪的分布可以很好地指示对流区。在对流发展初期,对流云团形状还不规则时,地闪多出现在云团发展前方;当对流发生合并时,在合并处附近会产生密集的地闪,合并后地闪减少;当对流发展旺盛后,冷云核心面积较为规则且较大时,地闪多集中出现在对流云发展后部且偏南处,TBB温度梯度变化较大的地方,而冷云核心区几乎没有地闪出现。从雷达组合反射率结果上看(图略),地闪也并非发生在雷达组合反射率中的回波核心区。发生负地闪的TBB集中在约-35~-58 ℃左右。发生正地闪对应的TBB约-30~-50 ℃,较负地闪的TBB高约-5~-8 ℃。

5 结论与讨论

受西南暖湿气流和冷空气共同影响,2024年1月30日—2月7日和2月18—23日我国遭遇了两次低温雨雪冰冻天气,期间伴随着密集的闪电过程,本文利用三维闪电定位数据、CLDAS-V2.0降水产品和Himawari-9号卫星红外云图资料,首先对比分析了两次过程中冬季雷暴闪电的时空特征、雷电流概率分布等,然后将地闪与降水量进行时空对比,最后挑选出闪电发生频数较多的三次个例,将TBB与闪电定位进行对比分析,并对地闪密度和对应的TBB数值进行了统计分析,主要得到以下结论:

(1) 两次过程中共监测到地闪数13万余次,其中正地闪2万余次,负地闪11万余次,正地闪约占总地闪数的15%。两次过程的地闪均具有夜发性,“0131”过程地闪频数峰值出现在22∶00—23∶00和次日02∶00—03∶00,而“0218”过程地闪频数峰值出现在23∶00—24∶00,正地闪较总地闪和负地闪峰值滞后约1~2 h。

(2) 两次过程地闪空间分布不同。“0131过程”中地闪主要分布在贵州中南部、湖南北部和西部、湖北西部和南部、重庆南部,地闪密度大值区(大于0.2次·km^2)集中在贵州南部及湖南、重庆、湖北三省交界的区域。“0218”过程中地闪主要分布在湖北中东部、江西北部、安徽、江苏和浙江大部,大值区主要分布在湖北东部、江西北部,江苏中部偏南和安徽南部。

(3) 两次过程中正地闪大多数只有一次回击,占到了正地闪数的90%以上,1~2次的回击数累计概率占到了95%。而负地闪首次回击的概率只有60%~80%。正地闪回击电流超过100 kA的概率约为5%,负地闪超过75 kA的概率不足5%,正地闪产生大电流的概率大于负地闪。

(4) “0131”过程中降水量和地闪的时空分布不一致,降水量峰值主要集中在白天,大于25 mm的降水主要集中在湖南东南部、安徽和江苏南部、江西、福建和浙江大部;而“0218”过程中降水量和地闪的时空分布较为一致,地闪出现峰值较降水量峰值延后2 h。

(5) 两次过程中地闪分布可以很好地指示对流区。地闪多分布在对流云团发展的尾部和南部,TBB温度梯度变化大的地带,对流发展最旺盛的冷云核心区几乎没有地闪发生;并且对流云团合并会使得地闪频数急剧增加,地闪多发生在对流合并处,但对流合并完成后地闪反而会有减少的趋势。两次过程网格地闪密度和对应的TBB数值之间呈偏态分布,TBB较低时,地闪密度较大;发生正、负地闪的TBB集中在约-30~-50 ℃和-35~-58 ℃,正地闪较负地闪的TBB高。

本文分析了2024年2月两次雨雪冰冻天气过程中地闪的时空分布特征,研究了地闪与降水量的关系,揭示了卫星TBB与闪电分布的关系,加强了对冬季闪电活动特征的认识。但需要说明的是,本文研究结果较为初步,仅以2024年2月的两次雨雪冰冻过程中的闪电活动为例,得到的结果还需进一步验证。而关于冬季雷暴的发生发展物理机制,如冬季雷暴云的起电机制与云微物理具体过程,以及冬季雷暴夜发性的物理机制等,仍有待通过更多的观测分析或数值模拟进一步探讨。

参考文献(References):

丁一汇,王遵娅,宋亚芳,等.2008.中国南方2008年1月罕见低温雨雪冰冻灾害发生的原因及其与气候变暖的关系[J].气象学报,66(5):808-825. Ding Y H, Wang Z Y, Song Y F, et al. 2008. Causes of the unprecedented freezing disaster in January 2008 and its possible association with the global warming [J]. Acta Meteorologica Sinica,66(5):808-825 (in Chinese). doi:10.3321/j.issn:0577-6619.2008.05.014

方俏娴,殷启元,李翔,等.2023.广州两次雷暴过程地闪与大气电场特征对比分析[J].暴雨灾害,42(1):47-56. Fang Q X, Yin Q Y, Li X, et al. 2023. Comparative analysis of characteristics of ground lightning and atmospheric electric field of two thunderstorm processes in Guangzhou [J]. Torrential Rainand Disasters,42(1):47-56 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2021-115

贺秋艳,刘越屿,杨加艳,等.2019.湖南省雷电活动及雷灾特征分析[J].气象科技进展,9(6):44-48. He Q Y, Liu Y Y, Yang J Y, et al. 2019. Characteristics of lightning activity and lightning disaster in Hunan [J]. Advances in Meteorological Science and Technology,9(6):44-48. doi:10.3969/j.issn.2095-1973.2019.06.007

刘红武,李振,陈龙,等.2020.湖南一次罕见雨雪冰冻天气过程分析[J].沙漠与绿洲气象,14(2):18-26. Liu H W, Li Z, Chen L, et al. 2020. Analysis of a rare consecutive cryogenic freezing rain in Hunan Provinc [J]. Desert and Oasis Meteorology,14(2):18-26 (in Chinese). doi:10.12057/j.issn.1002-0799.2020.02.003

马瑞阳,郑栋,姚雯,等.2021.雷暴云特征数据集及我国雷暴活动特征[J]

应用气象学报,32(2):358–369. Ma R Y, Zheng D, Yao W, et al. 2021. Thunderstorm feature dataset and characteristics of thunderstorm activities in China [J]. Journal of Applied Meteorological Science,32(3): 358–369 (in Chinese). doi:10.11898/1001–7313.20210308

郄秀书,张其林,袁铁,等.2013.雷电物理学[M].北京:科学出版社:101. Qie X S, Zhang Q L, Yuan T, et al. 2013. Lightning physics [M]. Beijing: Science Press:101 (in Chinese)

盛杰,毛冬艳,沈新勇,等.2014.我国春季冷锋后的高架雷暴特征分析[J].气象,40(9):1058–1065. Sheng J, Mao D Y, Shen X Y, et al. 2014. Analysis on characteristics of elevated thunderstorms behind cold fronts in China during spring [J]. Meteorological Monthly,40(9): 1058–1065 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000–0526.2014.09.003.

唐国瑛,李丰全,王莺,等.2022.青藏高原东北边缘地带2017—2020年地闪时空分布特征[J].干旱气象,40(5):849–856. Tang G Y, Li F Q, Wang Y, et al. 2022. Temporal and spatial distribution characteristics of cloud–to–ground lightning flashes in the northeastern verge of Tibetan Plateau from 2017 to 2020 [J]. Journal of Arid Meteorology,40(5): 849–856 (in Chinese). doi:10.11755/j.issn.1006–7639(2022)–05–0849

王娟,谌芸.2015. 2009—2012年中国闪电分布特征分析[J].气象,41(2): 160–170. Wang J, Chen Y. 2015. Analysis of the 2009–2012 lightning distribution characteristics in China [J]. Meteorological Monthly,41(2): 160–170 (in Chinese). doi: 10.7519/i.issn.1000–0526.2015.02.004

王学良,张科杰,余田野,等.2017.湖北地区云地闪频次及雷电流幅值时间分布特征[J].电瓷避雷器,2017(3):1–9. Wang X L, Zhang K J, Yu T Y, et al. 2017. The time distribution characteristics on frequency and peak current of cloud–to–ground lightning in Hubei Province [J]. Insulators and Surge Arresters,2017(3):1–9 (in Chinese). doi:10.16188/j.isa.1003–8337.2017.03.001

吴安坤,李艳,张淑霞,等.2017.贵州省闪电活动时空分布特征分析[J].防灾科技学院学报,19(1),56–62. Wu A K, Li Y, Zhang S X, et al. 2017. Analysis of temporal and spatial distribution characteristics of lightning activity in Guizhou Province [J]. Journal of Institute of Disaster–Prevention Science and Technology,19(1),56–62 (in Chinese)

吴古会,彭芳,崔庭,等.2012. 2011年冬季贵州雨雪冰冻天气的成因分析[J].气象,38(3):291–299. Wu G H, Peng F, Cui T, et al. 2012. Analysis of Guizhou's rare freezing catastrophic weather in winter 2011 [J]. Meteorological Monthly,38(3):291–299 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000–0526.2012.03.005

徐鸣一.2022.中国地区的闪电活动时空变化特征及其成因研究[D].南京:南京信息工程大学. Xu M Y. 2022. Temporal and spatial variation of lightning activity in China and its causes [D]. Nanjing:Nanjing university of information&technology (in Chinese)

曾金全,朱彪,曾颖婷,等.2017.福建省多回击闪电特征参数的统计分析[J].暴雨灾害,36(6):573–578. Zeng J Q, Zhu B, Zeng Y T, et al. 2017. Statistical analysis of characteristic parameters for multi–return stroke of cloud–to–ground lightning in Fujian [J]. Torrential Rain and Disasters,36(6):573–578 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004–9045.2017.06.011

Holle R L. 2014. Diurnal variations of NLDN–Reported cloud–to–ground lightning in the United States [J]. Monthly Weather Review,142(3): 1037–1052. doi:10.1175/MWR–D–13–00121.1

Kuhlman K M, Ziegler C L, Mansell E R, et al. 2006. Numerically simulated electrification and lightning of the 29 June 2000 STEPS supercell storm [J]. Monthly Weather Review,2006,134(10):2734–2757. doi: 10.1175/MWR3217.1

Ma M M, Huang X G, Fei J F, et al. 2022. Analysis of the winter cloud–to–ground lightning activity and its synoptic background in China during 2010–20 [J]. Advances Atmosphere Science,39(6):985–998. doi:10.1007/s00376–021–1260–2

Qie K, Qie X S, Tian W S. 2021. Increasing trend of lightning activity in the South Asia region [J]. Science Bulletin,66(1):78–84. doi:10.1016/j.scib.2020833

Qie X S, Liu D X, Sun Z L. 2014. Recent advances in research of lightning meteorology [J]. Journal of Meteorological Research,28(5):1054–1068. doi:10.11676/qxxb2014.048

Sun Z L, Qie X S, Liu M Y, et al. 2016. Characteristics of a negative lightning with multiple ground terminations observed by a VHF lightning location system [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres,121 (1), 413–426. doi:10.1002/2015JD023702

Tang G Y, Jiang R B, Sun Z L, et al. 2023. Characteristics of negative breakdowns in extinguished channels of a positive cloud–to–ground flash [J]. Atmosphere Research,293,106895. doi:10.1016/j.atmosres.2023.106895

Xia R D, Zhang D L, Wang B L. 2015. A 6–yr cloud–to–ground lightning climatology and its relationship to rainfall over central and eastern China [J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology,4(12):2443–2460. doi:10.1175/JAMC–D–15–0029.1

Xu L T, Zhang W J, Cao X, et al. 2022. A 10–year thundersnow climatology over China [J]. Geophysical Research Letters,49,e2022GL100734. doi: 10.1029/2022GL100734

Xu M Y, Qie X S, Pang W J, et al. 2022. Lightning climatology across the Chinese continent from 2010 to 2020 [J]. Atmospheric Research,275, 106251. doi:10.1016/j.atmosres.2022.106251

Yang J, Zhao K, Chen X C, et al. 2020. Subseasonal and diurnal variability in lightning and storm activity over the Yangtze River Delta, China, during mei–yu season [J]. Journal of Climate,33(12):5013–5033. doi: 10.1175/JCLI–D–19–0453.1

Yang X L, Sun J H, Li W L. 2015. An analysis of cloud–to–ground lightning in China during 2010–13 [J]. Weather and Forecasting,30(6): 1537–1550. doi: 10.1175/WAF–D–14–00132.1

Yuan S F, Qie X S, Jiang R B, et al. 2020. Origin of an uncommon multiple–stroke positive cloud–to–ground lightning flash with different terminations [J]. Journal of Geophysical Research:Atmospheres,125. doi: 10.1029/2019JD032098

Zheng D, Wang D H, Zhang Y, et al. 2019. Charge regions indicated by LMA lightning flashes in Hokuriku's winter thunderstorms [J]. Journal of Geophysical Research:Atmospheres,124:7179–7206. doi:10.1029/2018JD030060

（责任编辑　张　文）