北京地区的闪电时空分布特征及不同强度雷暴的贡献

王东方[1,2]，郄秀书[1,2,3]，袁善锋[1,2]，孙竹玲[1]，陈志雄[1,2]

李进梁[1,4]，张鸿波[1]，刘明远[1,2]，**Abhay Srivastava**[1]，刘冬霞[1,3]

1 中国科学院大气物理研究所 中层大气和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, 南京信息工程大学气象灾害预报与评价协作创新中心，南京，201104

4 兰州大学 大气科学学院，兰州，730000

摘　要：利用北京闪电定位网（BLNET-Beijing Lightning Network）和SAFIR3000定位网7年共423次雷暴的闪电资料，并按照雷暴产生闪电多少划分为弱雷暴（≤1,000次）、强雷暴（＞1,000次和≤10,000次）和超强雷暴（＞10,000次），分析了北京地区的闪电时空分布特征及不同强度等级雷暴对闪电分布的贡献。北京年均总闪电密度最大值约15.4 flash.km^{-2}.year^{-1}，平均值约为1.9 flash.km^{-2}.year^{-1}，大于8 flash.km^{-2}.year^{-1}的闪电高值区基本分布在海拔高度200米等高线以下的平原地带。不同强度雷暴对总雷暴闪电总量贡献不同，弱雷暴（超强雷暴）次数多（少），产生的闪电少（多），超强雷暴和强雷暴产生的闪电分别占总雷暴闪电的37%、56%。不同强度雷暴对总雷暴闪电密度高值中心分布和日变化特征影响显著，昌平区东部、顺义区中东部和北京主城区是总雷暴闪电密度大于12 flash.km^{-2}.year^{-1}的三个主要高值区中心，前两个高值中心受强雷暴影响大，而主城区高值中心主要受超强雷暴影响。总雷暴晚上频繁的闪电活动主要受超强雷暴和强雷暴影响，这两类雷暴晚上闪电活动活跃，分别占各自总闪电的69%和65%，而弱雷暴闪电活动白天陡增很快，对总雷暴午后的闪电活动影响大。另外，不同下垫面条件闪电日变化差异大，山区最强的闪电活动出现在白天，午后闪电活动增强很快，主峰值出现在北京时间18:00，而平原最强的闪电活动发生在晚上，平原（山麓）的主峰值比山区推迟了约1.5小时（1小时）。

关键词：BLNET SAFIR3000 雷暴 闪电 时空分布

Abstract: Based on the lightning data of 423 thunderstorms in the 7 years of BLNET

收稿日期：2019-03-15；修订日期：2019-04-04

网络预出版日期：

资助项目 国家自然科学基金重点项目 41630425

作者简介 王东方，1980 出生，博士研究生，主要从事大气电学方面的研究。Emai: wangdf@mail.iap.ac.cn

（BeijingLightning Network）and Surveillance et Alerte Foudre par Interometric Radioelectirque (SAFIR)-3000, and according to how many lightning flash is generated by thunderstorms, it is divided into weak thunderstorms (≤1,000 times) and strong thunderstorms (>1,000 times and≤10,000 times) and super thunderstorms (>10,000 times), analyzed the spatial and temporal distribution characteristics of lightning flash in Beijing and the contribution of total thunderstorms with different intensity levels to lightning flash distribution. The average annual lightning flash density in Beijing is about 15.4 flash.km^{-2}·year^{-1}, and the average is about 1.9 flash.km^{-2}.year^{-1}.The lightning flash density high value area greater than 8 flash.km^{-2}.year^{-1} is basically distributed in the plain area below the elevation of 200 meters above sea level. Different intensity thunderstorms contribute differently to the total thunderstorm lightning flash. The number of weak thunderstorms (super thunderstorms) is more (less), while the thunderstorms produce less lightning flash (more). The lightning flash generated by super thunderstorms and strong thunderstorms accounted for 37% and 56% of the total thunderstorm lightning flash, respectively. Different intensity thunderstorms have a significant impact on the distribution and daily variation characteristics of the total lightning flash intensity density of the total thunderstorm. The eastern part of Changping District, the central and eastern parts of Shunyi District and the main urban area of Beijing are the three thunderstorm lightning flash densities with a density greater than 12 flash.km^{-2}.year^{-1}. The first two high-value centers are greatly affected by strong thunderstorms, while the high-value centers in the main urban areas are mainly affected by super thunderstorms. The frequent lightning activities of thunderstorms in the evening are mainly affected by super thunderstorms and strong thunderstorms. These two types of thunderstorms were active at night, accounting for 69% and 65% of the total lightning flash, respectively, while the weak thunderstorm lightning activity increased rapidly during the day and greatly affected the lightning activity in the afternoon of the total thunderstorm. In addition, the difference in lightning conditions varies with different underlying conditions. The strongest lightning activity in the mountainous area occurs during the daytime. The lightning activity in the afternoon increases rapidly. The main peak appears at 18:00 in Beijing time, and the strongest lightning activity in the plain occurs at night. The main peak of the plain (Hawthorn) was delayed by about 1.5 hours (1 hour) than the mountainous area.

Keywords: BLNET,SAFIR3000,thunderstorm,lightning flash, temporal and spatial distribution

1、引言

近年来，随着城市化进程加速，电子电器设备广泛应用，雷击造成的直接和间接损失日益严重，因而了解并掌握超大城市区域的闪电时空分布特征有重要的科学意义和实际应用价值。随着闪电定位技术的发展，世界各国学者对各地的不同区域闪电活动规律开展了大量研究，很多研究认为由于城市热岛效应和人类活动造成的气溶胶增多，导致大城市区域的闪电活动明显增加(如：Westcott et al., 1995; Kar et al., 2009; Lal and Pawar,2011)。

北京是我国的政治、经济和文化中心，人口密集，工农业生产发达，关于北京地区雷暴和闪电活动规律的研究，一直受到国内学者的关注。早在20世纪90年代我国学者就利用有限的地闪定位资料对北京地区的闪电活动进行了研究。郄秀书等（1990）利用1988年8月的地闪定位资料研究发现，北京地区地闪峰值位于北部的燕山山脉和西部的太行山脉。陶祖钰等（1993）利用1989和1990年两夏季的地闪资料分析京津冀地区的闪电特征，认为地闪主要分布在五个区域，分别位于潮白河流域、北京到石家庄一带、永定河河谷、燕山山地以及天津到德州一线。郑栋等（2005）利用1995-1997年的地闪资料研究发现地闪的空间分布主要分布在北、西北、东、南和东南方向。

北京西北环山，其中燕山山脉最高峰超过2600米，东南平原，平均海拔在50米左右，东南部为渤海。随着近几十年来北京城市人口、交通的高速发展，高大建筑物不断增多，城市热岛效应等对雷暴的发展和演变产生了重要影响。夏季雷暴的传播路径主要有两条：西北向东南和西南向东北方向（Chen et al.，2012），在复杂的地形和下垫面影响下，雷暴从北京西部或北部山区向平原地区移动时，有时会增强为有组织的飑线强对流系统，而有时可能会减弱为分散的对流（孙继松等，2006, 2013；Xiao et al.，2017）。环境切变（尤其是中低层切变）、偏南气流和平原地区较好的热力条件是对流风暴成功传播下山、并在平原地区增强或维持的关键（陈明轩等，2012；肖现等，2013），城市化对降水强度也有着明显的增幅作用（Yang et al.，2014）

北京的城市化和平原地区较好的热力条件对雷暴的发展和演变产生了重要影响，那么近年来闪电特征有怎样的变化？Wu等（2016）利用2005-2007三年的SAFIR 3000闪电资料（包括云闪和地闪）分析了北京地区闪电的时空分布特征，发现闪电主要分布在北京东南部平原地区（包括城市地区）以及西南和东北部山区。但是所用的三年闪电资料有很大的年际变化，这一研究是否具有气候意义还需要更长时间的观测资料来检验。另外，以前的研究主要关注

雷暴闪电活动的总体分布特征，很少关注不同强度等级雷暴对总雷暴闪电时空分布及日变化的影响。因此，本文在此基础上，进一步增加了四年的闪电资料对北京地区的闪电时空分布特征进行详细研究，并探讨不同强度雷暴对闪电时空分布的贡献。

2、数据和方法

本文数据来源主要有两个：第一个是北京闪电定位网（BLNET）稳定运行的近四年（2015-2018年）快天线采集的闪电波形资料。BLNET的所有测站都是放置在24小时有人值守的北京市区县气象局， 2015年以后，BLNET的所有测站并入气象局内网，中心站大气所可以实时的监控查询各个基站的工作状态，测站的数据也实时传输中心站进行处理。BLNET是专为探测北京及周边地区闪电活动设计的局域性闪电定位网，同时具有云闪和地闪的定位能力（王宇等，2015；Wang et al.，2016），图1为北京闪电定位网BLNET的测站分布图。BLNET共由16个测站组成，各站的探测传感器主要有3-4个传感器：（1）快天线：工作频段均为 1.5 kHz～2 MHz，时间常数0.1ms；（2）慢天线：工作频段均为 1.5 kHz～2 MHz，时间常数200 ms；（3）磁天线传感器：探测频段为 3 kHz～300 kHz；（4）甚高频（VHF）传感器：中心频率72 MHz，带宽69～75 MHz。16个测站选择上述4个探测传感器中的3-4个配置，以多传感器实现对闪电放电过程的多频段探测，同时减小大城市群区域复杂的电磁环境对定位结果的影响。BLNET基本涵盖了云闪和地闪放电过程的主要频段，对总闪和地闪的探测效率分别为73.9%、93.2%。（Srivastava et al.，2017）。

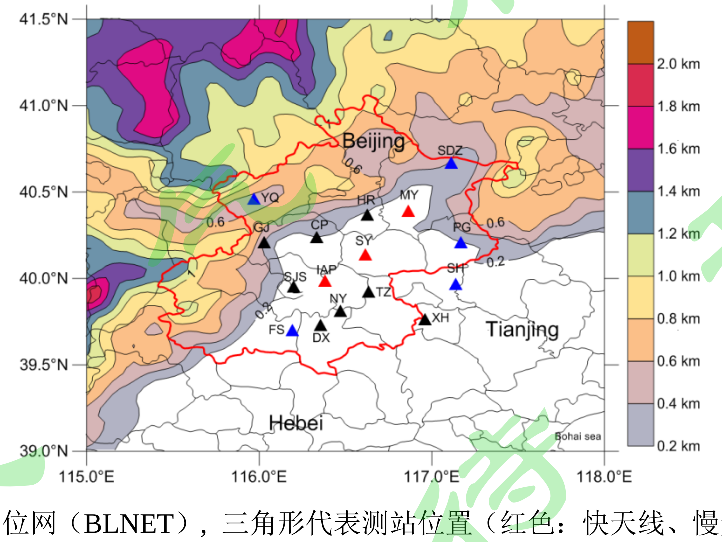


图 1 北京闪电定位网（BLNET），三角形代表测站位置（红色：快天线、慢天线、磁天线和甚高频天线；黑色：快天线、慢天线和甚高频天线；蓝色：快天线、慢天线和磁天线），色标代表海拔高度

Figure 1 BLNET, the triangle represents the station position (red: fast antenna, slow antenna, magnetic antenna and VHF antenna; black: fast antenna, slow antenna and VHF antenna; blue: fast antenna , slow antenna and magnetic antenna), color scales represent altitude

另外，本文也利用了SAFIR3000稳定运行期间的三年观测数据（2005-2007年），与Wu等（2016）所用资料相同。SAFIR3000由北京市气象局在2008年北京奥运会之前建设，共有3个测站，在北京奥运会前后运行良好（Zheng et al., 2009；Liu et al., 2011）。

BLNET和SAFIR3000两套定位系统均具有良好的全闪定位能力，在网内探测效率较高。两套系统的全闪定位资料均以放电辐射源的形式给出。一次闪电放电过程通常会产生大量的电磁辐射脉冲，因此为了与已有研究进行对比，需要按照一定的标准将辐射源聚类为一次闪电。关于闪电脉冲的归闪，目前尚没有一个公认的标准（郑栋等，2010；Liu et al. 2011；Wu et al. 2016；Srivastava et al.，2017）。参照已有研究，并对比分析两种归闪的标准（10km，500ms；10km，1s），结果表明，当采用距离小于10km，时间小于500ms进行聚类时，云地闪和正地闪比例相对更合理。因此，本文将辐射源聚类为一次闪电的距离范围和时间范围分别是10 km、500 ms。对于云闪，将定位的第一个辐射源发生的时间、位置和电流等信息作为这次云闪的信息；地闪信息则是以地闪首次回击的定位结果为代表。

另外，与所有基于波形进行地闪识别的雷电定位网类似，BLNET 和 SAFIR3000 两套定位网均存在将电流较大的云闪脉冲错误地识别为正地闪回击的情况。虽然 BLNET 已发展了由 12 个参数组成的识别云闪和地闪的波形判别标准（田野，2017），但是通过算法判别和人工识别的对比发现，仍然有一定的误判率。因此，根据 Cummins 等（1998）的建议，将定位系统探测到的峰值电流低于 10 kA 的正地闪归为云闪。此外，定位结果中除了大部分正确的闪电定位结果外，还有个别干扰或不合理的定位结果，因此，分析之前还要进行一定的数据质控。

通常，随着闪电距离定位网络的增加，闪电定位系统的探测效率会减小，定位误差会增大。但是在系统的覆盖范围内，比如北京及周边地区，SAFIR3000和BLNET都具有非常高的探测效率（Wu et al., 2016；王宇等，2015）和探测精度。利用击中BLNET覆盖范围内的高塔闪电进行对比，发现BLNET站网覆盖范围内，定位误差为50.0 m-250.0 m。因此，本文选择误差相对较小的区域（经度：115.0 °E-118.0 E °，纬度：39.0 °N-41.5 °N）进行研究，并以2.5km×2.5km对区域进行网格化，分别得到不同格点上的闪电时空分布。

2015-2018 年，BLNET 共观测到193次雷暴天气过程，记录到约45万次闪电。2005-2007年期间，SAFIR3000共观测到230次雷暴天气过程，记录约52万次闪电。观测时发现，影响

北京地区的雷暴过程可能是单个对流单体形式，也可能由同时间段不同区域发生的多对流单体组成。由于两套系统均是全闪探测，而且探测效率较高，即使是一次相对弱的雷暴过程也可能产生几十次，几百次，甚至上千次的闪电。不同强度的雷暴产生闪电的能力不同，通常发展强盛、强对流面积较大的雷暴系统可以产生更多的闪电（Shao et al. 2006），因此，一次雷暴产生闪电的多少可以在一定程度上反映雷暴的强弱。不同强度的雷暴对闪电整体的时空分布特征贡献不同。因此，为了了解北京闪电时空分布以及不同强度雷暴的贡献，本文在Wu等（2016）的基础上进行修正，根据一次雷暴过程产生的总闪电次数，将雷暴过程分成3个强度等级，分别是弱雷暴（≤1,000次）、强雷暴（＞1,000次和≤10,000次）和超强雷暴（＞10,000次）。据此将所探测到的423次雷暴过程进行分类，分别得到弱雷暴252次、强雷暴150次和超强雷暴21次。

3. 分析结果

3.1 北京地区闪电密度的空间分布特征

图2给出了所有雷暴和三个不同强度等级雷暴的总闪电密度空间分布。由图可见，所有雷暴的年均总闪电密度的高值区主要集中在北京东南部的平坦平原，以西部、北部的中起伏山地和倾斜平原为边界，其中年均总闪电密度最大值约15.4 flash.km^{-2}.year^{-1}，平均值约为1.9 flash.km^{-2}.year^{-1}，大于8 flash.km^{-2}.year^{-1}的闪电高值区中心基本分布在海拔高度200米等高线以下的平坦平原地带，而闪电密度大于12 flash.km^{-2}.year^{-1}高值区中心主要集中在三个区域，分别是北京主城区、昌平东部和顺义东部。

超强雷暴、强雷暴以及弱雷暴总闪电年均密度高值区空间分布有明显的差异。强雷暴活动中总闪电密度极大值主要分布在昌平东部、顺义中东部其邻近平谷和三河的交界处以及海淀区，强雷暴的总闪电密度最大值约为7.0 flashes.km^{-2}.year^{-1}。强雷暴过程总闪电密度的高值区和地形特征密切相关。平谷属于山地地形，其北部、东南部和南部三面都是小起伏山地，西南是平坦的平原，形成朝向顺义的“V”型地形，类似喇叭口状地形，顺义的中东部刚好位于这种喇叭口状地形的入口处，这种特殊的地形对水汽有很好的阻滞和汇集作用。另外，当气流进入到喇叭口之后，因地形收缩，使气流辐合加强，而且其地势北高南低，气流产生抬升，容易形成局地环流；同样，昌平西部、北部和西南部的地形与平谷周边的地形类似，地势相对较高，属于中起伏山地，东部是平坦平原；而海淀西南侧也是一个小的喇叭口地形。因此，容易造成顺义中东部、昌平东部以及海淀区形成闪电密度高值中心。相对而言，超强雷暴高值区位置更偏南，与所有雷暴的总闪电密度极大值区域最为一致，其闪电密度高值区

几乎覆盖了北京主城区绝大多数区域，以朝阳区为中心，形成了包括昌平东南部、顺义西南部以及通州西北部的高值区，总闪电密度最大值约8.9 flashes.km^{-2}.year^{-1}。由图2（d）可见，相对超强雷暴和强雷暴，弱雷暴的闪电密度量级很小，最大值约为1.4 flashes.km^{-2}.year^{-1}，而且明显高值中心很少，零星分布在北部山区。总之，从不同强度雷暴的空间分布可见，超强雷暴和强雷暴决定了总体雷暴的时空分布走势，其中强雷暴与地形关系密切，而城市有利于超强雷暴发展和增强。

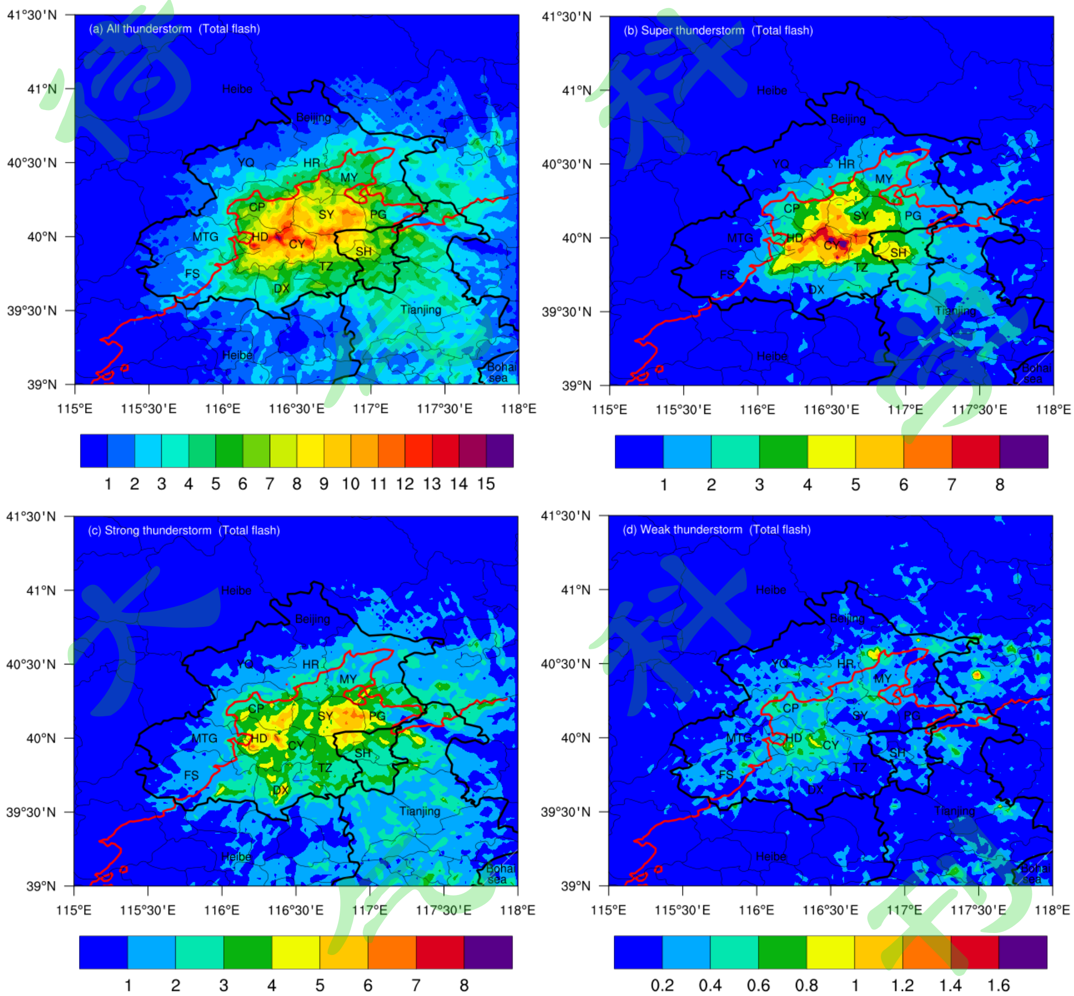


图 2 总雷暴（a）、超强雷暴（b）、强雷暴（c）和弱雷暴（d）总闪电年均密度空间分布，图中红线为海拔高度 200 米等高线（单位：flashes.km^{-2}.year^{-1}）

Figure 2 The annual average density distribution of total lightning flash of total thunderstorm (a), super thunderstorm (b), strong thunderstorm (c) and weak thunderstorm (d) . The red line in the figure is the elevation line of 200 meters above sea level (unit: flashes. km^{-2}.year^{-1})

由上面的分析可见，不同强度等级的雷暴对总闪电的贡献有明显的差别，总雷暴偏北和偏东的高值中心（昌平区、顺义区）主要受强雷暴影响，位置更南的主城区高值中心主要受超强雷暴影响。表 1 进一步给出了三个不同雷暴强度等级所产生的闪电占总闪电的百分比。由表 1 可见，雷暴过程中虽然以弱雷暴过程次数最多，但是产生的闪电（总闪电、地闪和正地闪）数量占总对应闪电类型的比例均是最少（不超过 10%）。强雷暴和超强雷暴对总雷暴闪电总量贡献最大，特别是超强雷暴，虽然次数最少，仅有 21 次，不到强雷暴次数的 1/7，但是其总闪电、地闪和正地闪占总闪电的约 1/3。这说明在三个强度等级雷暴中，超强雷暴产生闪电的效率很高，造成的危害也最大。

表 1 不同雷暴强度等级统计结果

Table 1 Statistical results of different thunderstorm intensity levels

雷暴等级	雷暴次数（次）	雷暴产生闪电占总闪比例（%）	地闪占总闪比例（%）	正地闪占地闪比例（%）
弱雷暴	252	7	8	9
强雷暴	150	56	56	63
超强雷暴	21	37	36	28

3.2 北京地区地闪密度的空间分布特征

地闪是雷暴云中电荷直接释放到地面的放电过程，对人畜、高建筑以及电子产品可造成直接或者间接的影响。因此，一直受到许多学者的关注，图3给出了所有雷暴以及不同雷暴强度的地闪年均密度的空间分布。由图可见，虽然地闪密度的高值区覆盖范围、年均闪电密度量级相对总闪电高值区小很多，但是总雷暴的地闪高值区与总闪电密度高值区分布总趋势基本一致，但地闪密度高值区位置相对总闪密度高值区更偏东或者偏南。。最大年均地闪密度约为4.8 flash.km^{-2}.year^{-1}，平均值约为0.6 flash.km^{-2}.year^{-1}。

不同强度等级的雷暴除了空间分布不同，高值区的集中程度也不一样。超强雷暴地闪密度最大高值区域相对集中，主要发生在昌平-通州-顺义交界处，最大闪电密度约为 3.0 flashes.km^{-2}.year^{-1}，而强雷暴地闪密度高值区相对分散，主要位于海淀和顺义中东部，最大闪电密度约为 2.5 flashes.km^{-2}.year^{-1}。弱雷暴产生很少的地闪，年均闪电密度最小，最大值仅为 0.5 flashes.km^{-2}.year^{-1}，除了分布在城区，山区也有相当比例的地闪。由于强雷暴次数

是超强雷暴次数约 7 倍，这说明超强雷暴的强中心重复出现在城区一些特点的地区，导致该地区对应出现闪电密度的最大值，而强雷暴的次数很多，但闪电密度的最大值很分散，说明强雷暴的强中心分布范围更广，在同一区域重复发生的几率小于超强雷暴。

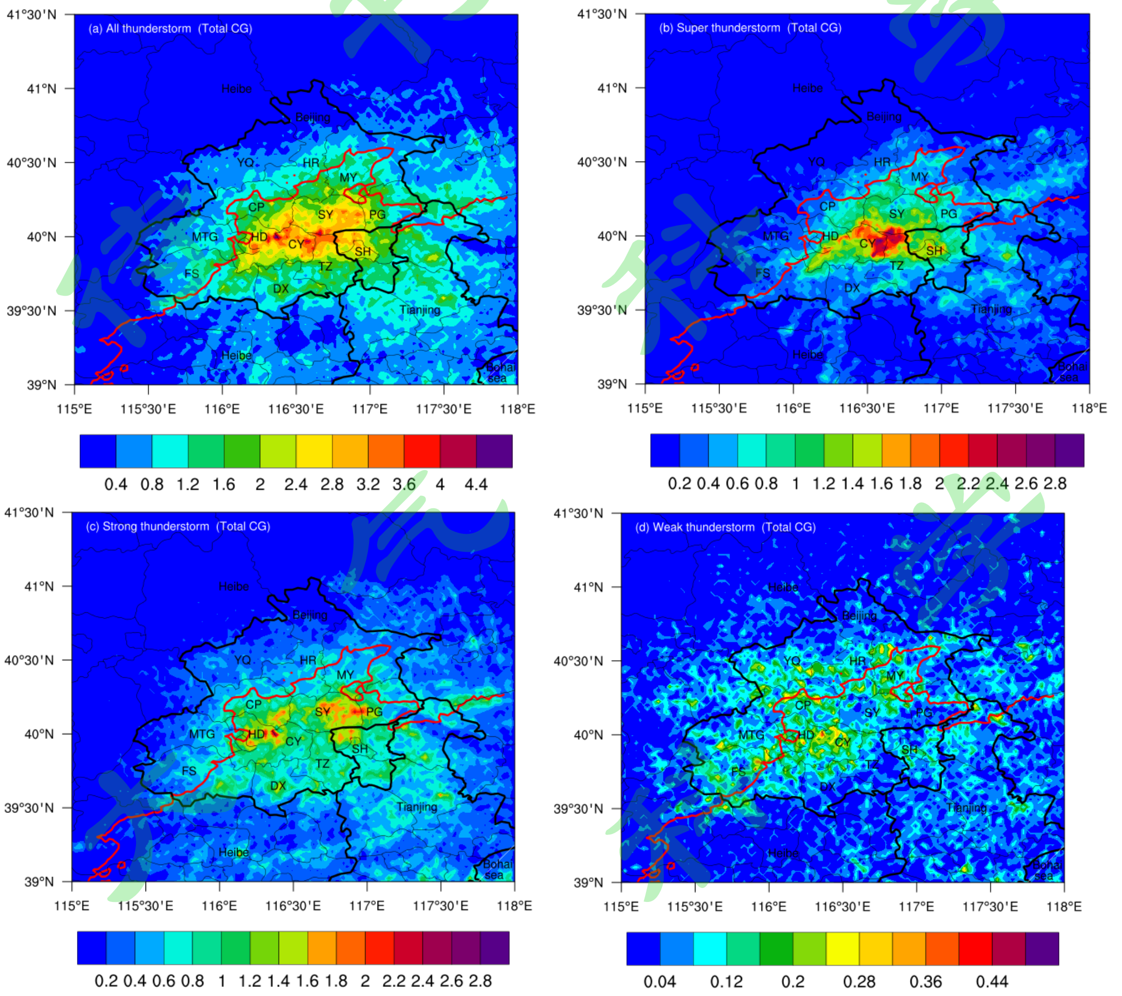


图 3 总雷暴（a）、超强雷暴（b）、强雷暴（c）和弱雷暴（d）地闪年均密度的空间分布（单位：flashes.km^{-2}.year^{-1}）

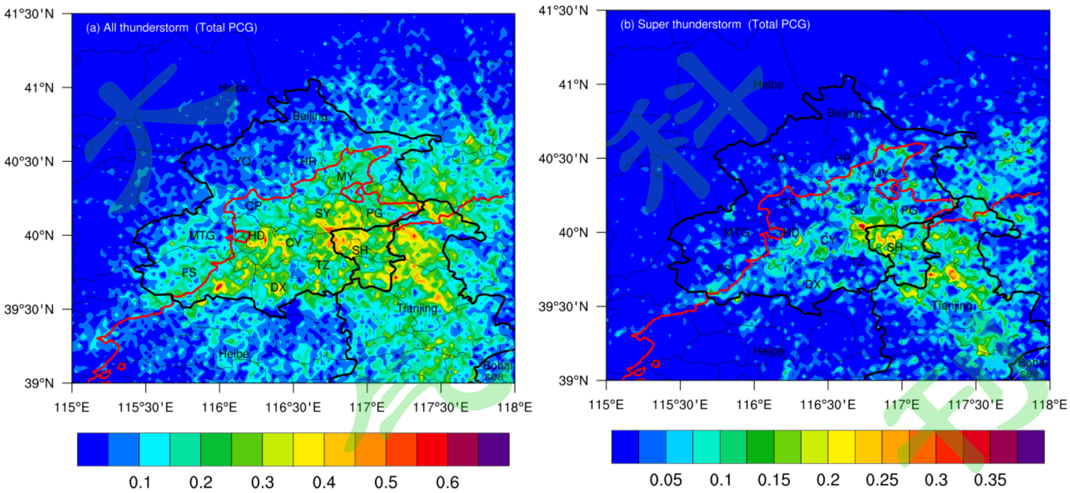
Figure 3 The annual average density distribution of cloud to ground（CG） lightning flash of total thunderstorm (a), super thunderstorm (b), strong thunderstorm (c) and weak thunderstorm (d) (unit: flashes.km^{-2}.year^{-1})

3.3 北京地区正地闪密度的空间分布特征

图4给出了所有雷暴以及不同雷暴强度的正地闪年均密度的空间分布。与总闪电和地闪相比，正地闪高值区的分布相对零散，主要分布在雷暴传播的下游，如与三河的交界处、天

津北部地区以及北京最南端的大兴和房山，密度量级更小，所有雷暴的年均正闪电密度最大值约为0.7 flash.km^{-2}.year^{-1}，平均值约为0.1 flash.km^{-2}.year^{-1}，其中大于0.5 flash.km^{-2}.year^{-1}的高值区主要分布顺义-通州-三河的交界处和天津北部于桥水库西侧地区。

强雷暴正地闪的高值区与总雷暴的分布最一致，高值中心除了分布在在顺义、海淀和天津北部外，北京最南侧的房山、大兴和通州也有高值中心，最大值约 0.6 flash.km^{-2}.year^{-1}。由于超强雷暴的次数很少，只有两个比较大的高值中心，分别位于顺义-通州-三河交界处以及于天津于桥西侧，正地闪闪电密度最大值比强雷暴小，约为 0.4 flash.km^{-2}.year^{-1}。对雷达资料的统计表明，约 55%的雷暴过程经三河出境北京后，对流回波强度明显减弱，回波强度基本在 35dBZ 以下，这表明这个阶段属于雷暴发展的后期或者雷暴强度有所减弱，特别是从西北或者西部过境北京的雷暴这种趋势很明显。从雷暴正地闪高值中心所对应区域和总闪电、地闪高值中心对应区域经纬度的对比，并结合雷暴的发展演变趋势可以认为强雷暴消散减弱阶段的气象条件有利于正地闪的发生。很有意思的是，正地闪主要的高值中心发生在距离水源较充沛的地区附近，如潮白河三河段和于桥水库西侧。这表明地表水源附近有利于高比例正地闪的发生。



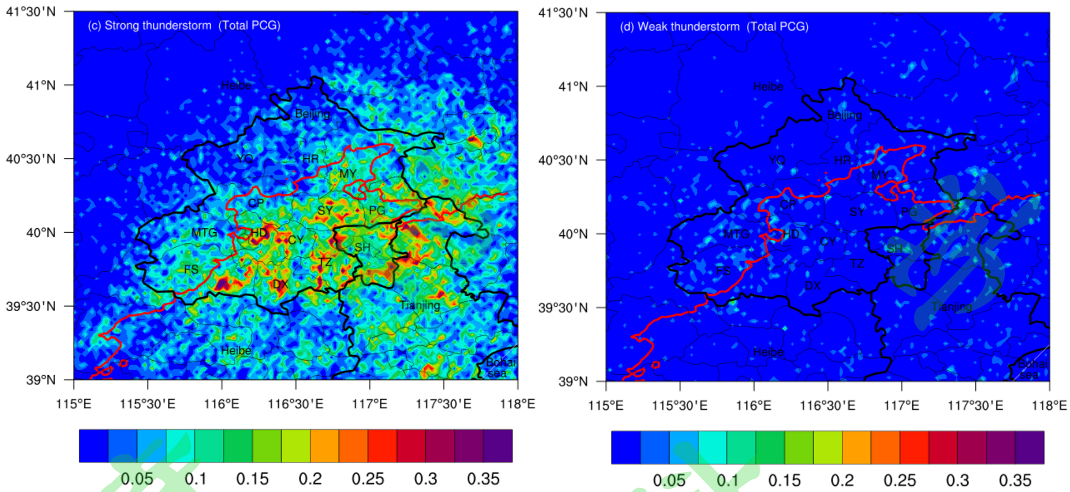


图 4 总雷暴（a）、超强雷暴（b）、强雷暴（c）和弱雷暴（d）正地闪年均密度空间分布（单位：flashes.km^{-2}.year^{-1}）

Figure 4 spatial density distribution of positive cloud to ground（PCG）lightning flash of total thunderstorm (a), super thunderstorm (b), strong thunderstorm (c) and weak thunderstorm (d) (unit: flashes.km^{-2}.year^{-1})

3.4 闪电活动的月变化和日变化特征

将闪电区分为云闪、地闪和正地闪，将雷暴区分为三个不同强度等级（超强雷暴、强雷暴和弱雷暴），不同类型的闪电和雷暴月变化示于图5（a）-（b）中。由图可以看出，雷暴和闪电峰值主要出现在夏季，雷暴过程最早出现在3月底，最晚出现在10月下旬，雷暴开始月和结束月均以弱雷暴为主，而强雷暴主要出现在4月-9月，超强雷暴多出现在6月-8月，以7月最多（57%）。夏季的6月至8月雷暴次数最多，同时也出现了最多的闪电次数，其中7月份是雷暴次数和闪电次数最多的月份。尽管6月份和8月份的弱雷暴、强雷暴次数相差不大，但是由于8月份的超强雷暴比6月份多了5次，导致总闪电比例比6月份多了约10%。这表明超强雷暴产生闪电的效率很高。由图5（b）可知，闪电以云闪（IC）为主，约占总闪电的约75%，地闪（CG）只占约25%， CG中约13％是正地闪。

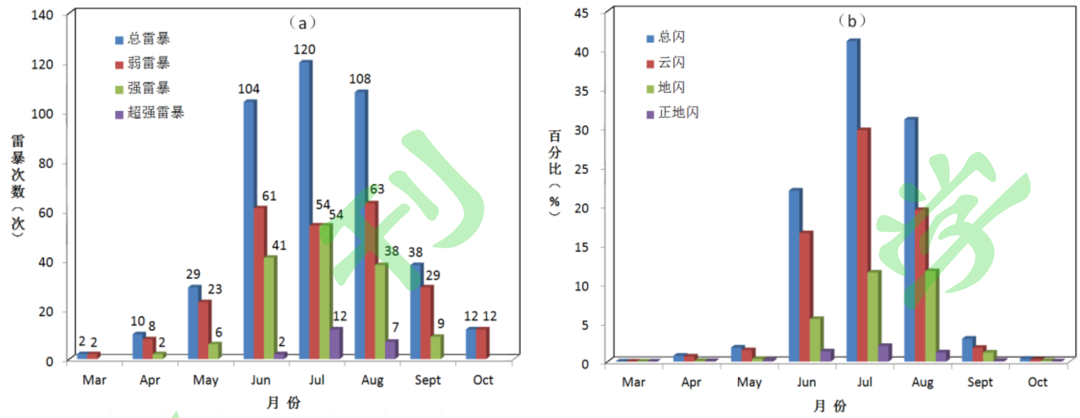


图5 雷暴过程（a）和闪电频数（b）的月变化

Figure 5 Monthly variation of thunderstorm process (a) and lightning frequency (b)

图 6 给出了总雷暴和不同强度雷暴过程总闪电、地闪以及正地闪的日变化。由图可知，总体而言，总雷暴闪电活动的活跃时段主要集中在午后至午夜，闪电活动的次峰值出现在傍晚 17:00，主峰值出现在晚上 19:00。由图 6（b）-（c）可知，超强雷暴和弱雷暴昼夜反差较大，超强雷暴主要的闪电活动集中在晚上，约占超强雷暴总闪电的 67%，而弱雷暴主要的闪电活动集中在白天。超强雷暴晚上前半夜闪电活动非常频繁，午后 15:00 左右闪电活动开始逐渐增强，总闪电在傍晚 17:00 首次出现次峰值，18:00 出现一个弱的回落，而后迅速增加，夜晚 20:30 再次出现主峰值，而后闪电活动开始减弱，但强闪电活动一直持续至午夜，次日凌晨 1:00 以后，闪电活动迅速减弱弱。与之相反，弱雷暴最频繁的时段出现在白天，闪电活动陡增出现在午后，闪电活动开始增强启动的时间比超强雷暴早，14:00 左右闪电活动明显增强，于 17:30 出现主峰值，入夜以后闪电活动明显减弱。虽然整体上强雷暴昼夜的反差没有超强雷暴和弱雷暴对比那么明显，但是最频繁闪电活动时段仍出现在晚上，约占强雷暴总闪电的 65%，但主峰值比超强雷暴早约 1.5 小时（19:00）。因此，总雷暴晚上的闪电活动主要受超强雷暴和强雷暴影响，三种类型雷暴对总雷暴午后至傍晚闪电活动有不同程度的影响，但以弱雷暴的贡献最大。

从总的趋势来看，地闪与总闪电的日变化趋势类似，总闪电活动频繁的时段也是地闪活动的活跃期，但是地闪活动的主峰值与总闪电主峰值存在相位差。超强雷暴地闪白天的次峰值滞后总闪次峰值约 1 小时，晚上地闪的主峰值滞后总闪电主峰值约 0.5 小时。强雷暴地闪白天的次峰值和总闪出现的时间一致，但比超强雷暴提前约 14:30，晚上的地闪主峰值比总闪电主峰值滞后约 0.5 小时。超强雷暴和强雷暴共同的特点是午夜至次日凌晨还有 2 个地闪活动的次峰值。这表明雷暴强度稍微减弱时地闪比例有所增强。与总闪变化趋势一样，弱雷

暴的主峰值和次峰值均出现在午后至傍晚时段，次峰值出现在午后 15:00，两个主峰值分别出现在 16:30 和 17:30，午后 11:00 以后，地闪增加很快。这表明热力条件与弱雷暴地闪关系密切。由于正地闪的次数很少，变化趋势上看只有一个明显的主峰值，强雷暴和弱雷暴正地闪的主峰值出现在总闪电主峰值之前，超强雷暴正地闪主峰值出现在总闪电首次次峰值之后。

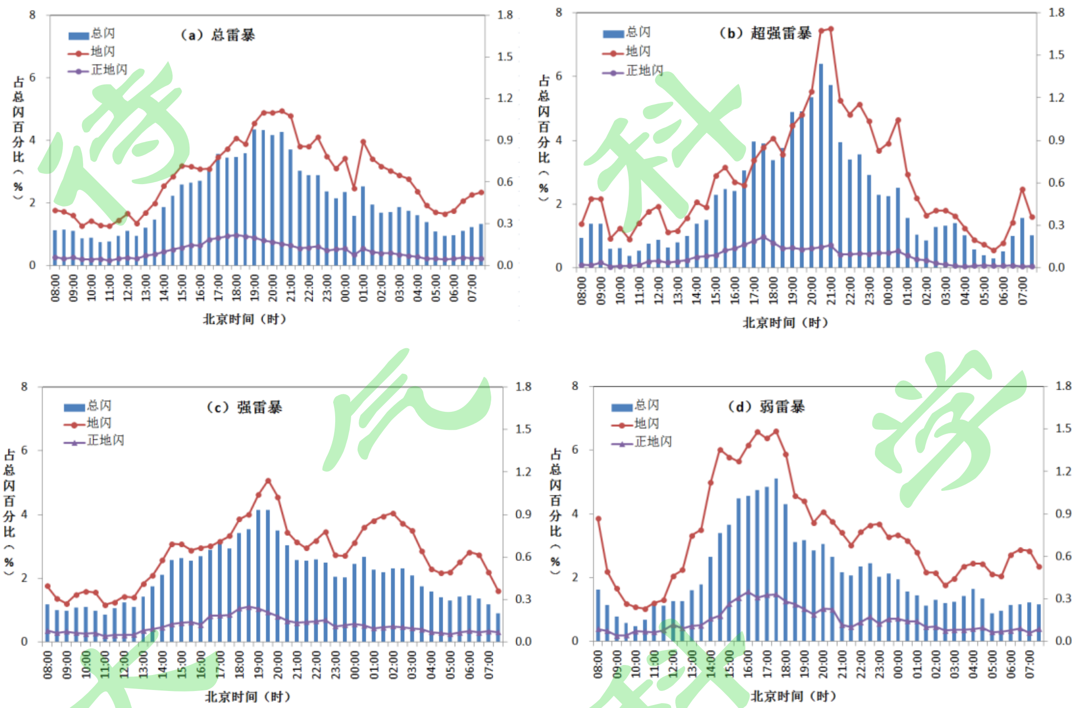
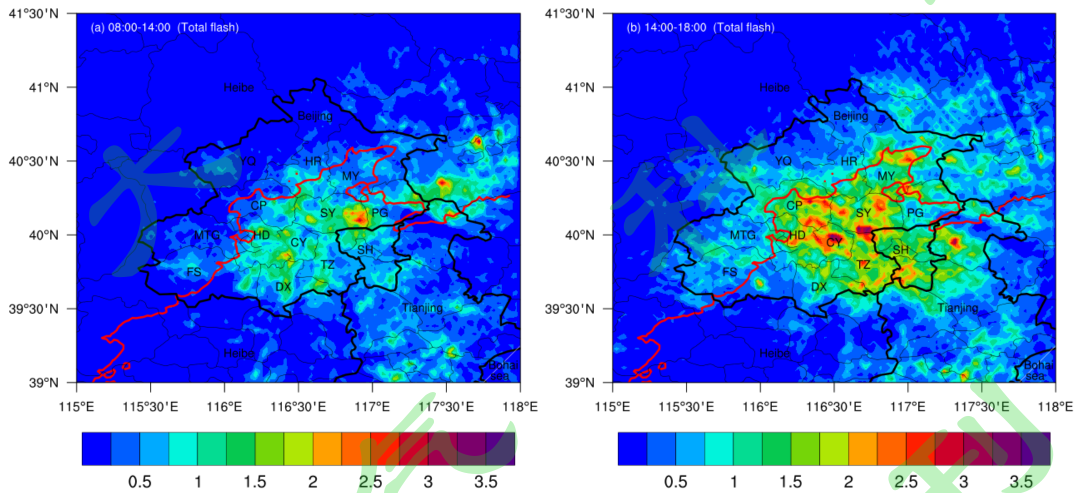


图 6 总雷暴（a）、超强雷暴（b）、强雷暴（c）和弱雷暴（d）中总闪电、地闪以及正地闪的日变化（左边纵坐标：总闪；右边纵坐标：地闪和正地闪）

Fig. 6 Diurnal variation of total lightning flash, cloud to ground lightning flash and positive cloud to ground lightning flash in total thunderstorm (a), super thunderstorm (b), strong thunderstorm (c) and weak thunderstorm (d) (left ordinate: total lightning flash; right ordinate : CG lightning flash and PCG lightning flash)

根据闪电的日变化特征，将一天划分为 4 个不同时段（08:00-14:00、14:00-18:00、18:00-02:00 及 02:00-08:00），得到所有雷暴过程不同时段闪电的空间分布（见图 7）。由图 7（a）可知，08:00-14:00 闪电密度的高值中心很少，最大年均闪电密度约为 3.5 flashes.km^{-2}.year^{-1}，平均年均闪电密度约为 0.3 flashes.km^{-2}.year^{-1}，大于 2.9 flashes.km^{-2}.year^{-1}

的中心只有三个，范围很小，最大的高值区处于顺义东部临近平谷边界，其他两个小的高值区位于河北东部，总体上该时段是上述 4 个时段中雷暴活动最弱。14:00 以后，即 14:00-18:00 时段，在 200 米海拔等高线沿线以及东南平原出现了很多闪电密度的高值中心，相对前一时段，该时段年均闪电密度相对前一时段增加明显，最大闪电密度增加到 3.7 flashes.km^{-2}.year^{-1}，平均年均闪电密度增加到约 0.5 flashes.km^{-2}.year^{-1}，且其高值区的覆盖范围也远远大于前一时段。这表明，随着午后太阳高度角增加，辐射加热增强，热力条件充沛有利于对流的发展，闪电活动逐渐活跃。入夜以后（18:00-02:00），闪电活动愈加频繁，与 14:00-18:00 闪电密度的最大值等同的量级基本覆盖整个北京东南平原，强中心在北京主城区，形成了以朝阳区为中心，包括昌平东南部、顺义东部以及通州北部的闪电密度高值区亮带，最大闪电密度约为 9.1 flashes.km^{-2}.year^{-1}，平均年均闪电密度增加到约 0.9 flashes.km^{-2}.year^{-1}。02:00 以后至日出前，闪电活动相对前一时段明显减弱，强度与 14:00-18:00 相似，以昌平东部为中心，形成沿着 200 米海拔等高线东北-西南走向仍出现闪电密度的高值带，这表明该时段雷暴受地形的抬升作用，山地附近仍维持较强的对流活动，但城区的闪电活动已经明显衰减。



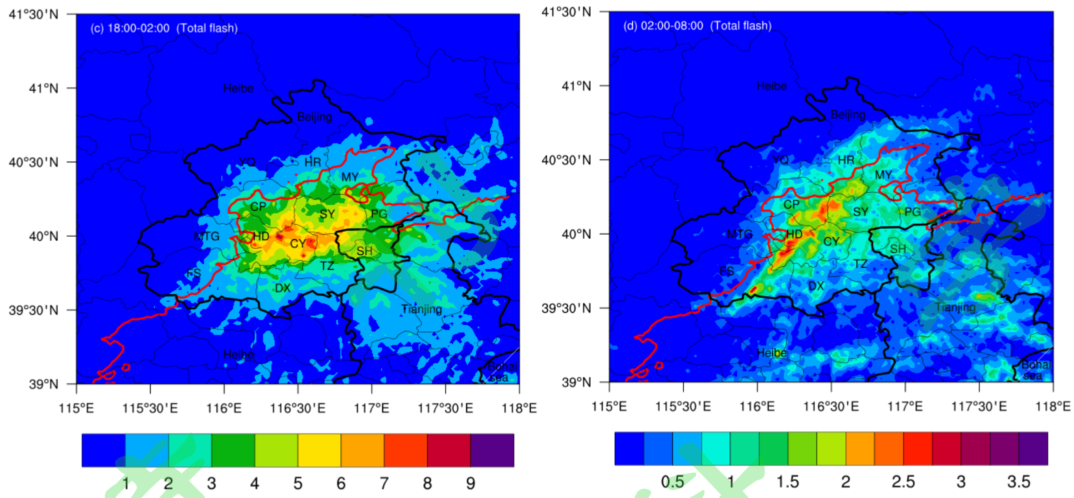


图 7 不同时段闪电的空间分布（单位：flashes.km^{-2}.year^{-1}）

Figure 7 Spatial distribution of lightning flash at different times (unit: flashes.km^{-2}.year^{-1})

根据北京及周边的地形特点，本文将海拔高度低于 100 米区域定义为平原， 400 米以上的区域定义为山区，100 米~400 米之间的区域定义为山麓。图 8 给出了这三类不同下垫面条件下所有雷暴过程的总闪电和地闪日变化特征。由图可见，无论是总闪电还是地闪，平原地区闪电活动的日变化主峰值时间均比山区地区滞后约 1.5 小时，比山麓地区晚 0.5 小时。山区闪电日变化的主峰值和次峰值均出现在白天，而平原地区闪电日变化的主峰值出现在晚上，次峰值出现在傍晚。山区和平原闪电日变化的昼夜变化较大，午后，随着太阳高度角的升高，太阳的辐射加热山地南坡的低层大气，容易产生对流系统，山区地区闪电活动很快达到峰值，于 18:00 到达主峰值。入夜后，随着热力条件和不稳定能量减弱，闪电活动迅速下降。与山区不同，虽然午后至傍晚也是闪电活动的活跃时段，但是最频繁的闪电活动主要集中在晚上，闪电活动的主峰值出现在 19:30。相对白天，晚上闪电活动下降的趋势很缓，闪电活动仍然很活跃，强闪电活动一直持续至到次日凌晨。结合北京的地形特点分析，大部分雷暴的传播方向是从西部、西北往东或东南传播，或减弱或增强。从统计的结果看，这些从山区传播下来的雷暴，由于受到城市环境和平原地区有利的气象条件共同影响，下山后雷暴容易在平原地区进一步发展和增强，有时会在中心城区发展成危害很大且持续时间很长的强飑线系统或雷暴群。

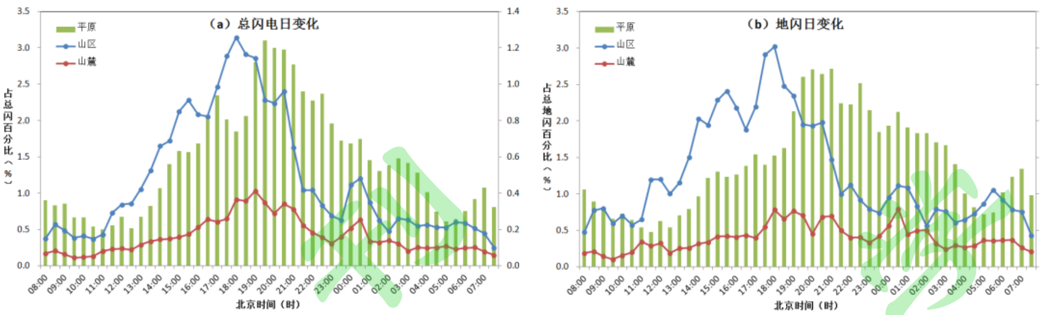


图 8 不同下垫面条件总闪电（a）、地闪（b）的日变化

（左边纵坐标：平原；右边纵坐标：山区和山麓）

Figure 8 Dimensional changes of total lightning flash (a) and CG lightning flash (b) under different underlying conditions (left ordinate: plain; right ordinate: mountain and haw)

4. 结论和讨论

利用北京闪电定位网 BLNET 和 SAFIR3000 定位网 7 年共 423 次雷暴的闪电资料，分析了北京地区的闪电时空分布特征，并将雷暴按照产生闪电的多少分为弱雷暴（≤1,000 次）、强雷暴（＞1,000 次和≤10,000 次）和超强雷暴（＞10,000 次），分析了不同强度等级雷暴对闪电分布的贡献，得到以下结论：

（1）雷暴闪电密度高值区主要集中在北京东南部平原，以西部、北部的中起伏山地和倾斜平原为边界。不同强度等级雷暴闪电活动空间分布差异显著。强雷暴闪电活动主要分布在喇叭口状地形附近，而超强雷暴闪电活动所在的位置更偏南，中心位于北京主城区。这表明地形与强雷暴的发展和演变关系密切，城市环境有利于雷暴发展成超强雷暴。

（2）不同强度等级雷暴对总雷暴的闪电总量贡献和闪电密度高值中心分布影响显著。弱雷暴次数虽然占总雷暴次数的一半以上，但只贡献了不到 10%的闪电。超强雷暴次数仅占总雷暴次数不到 5%，却贡献了 37%的闪电。总雷暴中以朝阳区为中心呈东-西走向的闪电密度高值带主要受超强雷暴影响，而总雷暴的另外两处主要闪电密度高值区（昌平东部和顺义中东部）由强雷暴所致，弱雷暴对总雷暴的影响有限。

（3）不同强度等级雷暴对总雷暴闪电活动日变化有显著影响。超强雷暴和弱雷暴昼夜反差较大，超强雷暴主要的闪电活动集中在晚上，而弱雷暴主要的闪电活动集中在白天。总雷暴晚上的闪电活动主要受超强雷暴和强雷暴影响，午后至傍晚的闪电活动受三种类型雷暴不同程度的影响，但以弱雷暴的贡献最大。

（4）不同下垫面条件下闪电日变化差异大，山区闪电活动主要出现在白天，入夜以后

闪电活动迅速下降，而平原白天闪电活动相对较弱，主要闪电活动集中在晚上。山区闪电活动主峰值比平原（山麓）1.5 小时（1 小时）。热力条件对山区闪电活动日变化影响大，而城市环境对平原闪电活动日变化存在潜在影响。

之前的研究认为地闪主要集中在北京及周边地区山区和海滨（郄秀书等，1990；何晖和李宏宇，2005；郑栋等，2005；周筠珺等，2009；李京校等，2013），而本文得到的结果是闪电密度的高值区主要分布在以海拔高度 200 米等高线为界的北京东南平原，特别是中心城区。这表明随着区域城市化进程的加速，城市的热动力条件对超强雷暴的启动和增强产生了影响。雷暴之所以在城市中心持续发展和增强，其原因可能与其局地环境、下垫面条件以及水汽的输送通道有关。研究表明，城市与郊区下垫面的热力差异容易形成城市中尺度风场辐合线，造成空气的强烈上升运动和能量、水汽的聚集，以致对流天气系统在城市中心上空发展和增强（王华等，2008；徐燕等，2018）。城市污染可以提高云凝结核（CCN）的浓度，这可能导致云内发生的微物理过程发生变化。因此，雷云中的电荷分离可能会受到干扰，因为它取决于云粒子的浓度，相位和大小。从这个意义上说，Orville et al（2001）提出，边界层中增加的污染将有助于抑制平均液滴尺寸，因此更多的云水可用于分离电荷，从而产生更多的地闪。另外，北京地区雷暴闪电活动的昼夜变化差异，山区、平原以及山麓闪电日变化的明显不同与该地区不同的下垫面条件、雷暴的传播路径、山地地形、平原地形引起的局地环流和对流系统触发存在密切关系（Surcel 等，2010；Koo and Hong，2010； Yin 等，2011；Lin 等，2011；Yuan 等，2014； Ronald et al.2017；Xiao 等，2017）。

参考文献（References）

Cummins K L, Murphy M J, Bardo E A, et al.1998. A Combined TOA/MDF Technology Upgrade of the U.S. National Lightning Detection Network[J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres， 103(D8):9035-9044.

Chen M., Y Wang, F Gao,and X Xiao, 2012.Diurnal variations in convective storm activity over contiguous north China during the warm season based on radar mosaic climatology, J. Geophys. Res., 117, D20115, doi:10.1029/2012JD018158.

陈明轩，王迎春，肖现，高峰.2012.基于雷达资料 4DVar 和三维云模式对一次超级单体风暴发展维持热动力机制的模拟分析. 大气科学，2012，36 (5) :929-944.

Chen M, Y Wang, X Xiao, et al. 2012. A case simulation analysis on thermodynamical mechanism of supercell storm development using 3-D cloud model and 4-D variational assimilation on radar data [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 36 (5): 929-944.

何晖，李宏宇. 2005.北京地区闪电特征初探[J].气象科技，33(6):496-500.

He H., and H Li, 2005: Preliminary analysis of lightning characteristics in Beijing (in Chinese). Meteor. Sci. Tech., 33, 496–500.

Kar S K, Liou Y A, Ha K J. 2009. Aerosol effects on the enhancement of cloud-to-ground lightning over major urban areas of South Korea[J]. Atmospheric Research, 92(1):80-87.

Koo M and Y. Hong .2010. Diurnal variations of simulated precipitation over East Asia in two regional climate models, J. Geophys. Res.,115, D05105, doi:10.1029/2009JD012574.

Lal D M, Pawar S D. 2011. Effect of urbanization on lightning over four metropolitan cities of India[J]. Atmospheric Environment, 45(1):191-196.

Lin, P.-F., P.-L. Chang, B. J.-D. Jou, J. W. Wilson, and R. D. Roberts .2011.Warm season afternoon thunderstorm characteristics under weak synoptic-scale forcing over Taiwan island, Weather Forecasting, 26(1), 44–60, doi:10.1175/2010WAF2222386.1.

Liu D., X Qie, Y Xiong,and G Feng, 2011:Evolutionof the total lightning activity in a leading-line and trailing stratiform mesoscale convective system over Beijing. Adv. Atmos. Sci., 28,866–878, doi:10.1007/s00376-010-0001-8.

李京校，宋海岩，肖稳安等.2013.北京及其周边地区闪电活动的时空特征[J]. 大气科学学报，36(2):235-245.

Li J.,H Song. W Xiao et al.,2013:Temporal-spatial characteristics of lightning over Beijing and its circumjacent regions (in Chinese). Trans. Atmos. Sci., 36, 235–245.

Orville, R.E., Huffines, G., Nielsen-Gammon, J., Zhang, R.,Ely, B., Steiger, S., Phillips, S., Allen, S., Read, W.,2001.Enhancement of cloud-to-ground lightning over Houston, Texas. Geophysical Research Letters 28 , 2597–2600.

郄秀书，郭昌明，刘欣生.1990.北京与兰州地区的地闪特征[J].高原气象,9(4):388-394.

Qie X., C Guo, and X Liu, 1990: The characteristics of ground flashes in Beijing and Lanzhou regions. Plateau Meteorology., 9(4):388-394.

Ronald L. Holle, Martin J. Murphy.2017.Lightning over Three Large Tropical Lakes and the Strait of Malacca: Exploratory Analyses., MONTHLY WEATHER REVIEW,12(145), 4559-4573, DOI: 10.1175/MWR-D-17-0010.1.

Surcel, M., M. Berenguer, and I. Zawadzki.2010.The diurnal cycle of precipitation from continental radar mosaics and numerical weather prediction models. Part I: Methodology and seasonal comparison, Mon. Weather Rev., 138(8), 3084–3106, doi:10.1175/2010MWR3125.1.

Srivastava Abhay, Tian Y, Qie X, Wang D, Sun Z, Yuan S, et al.2017. Performance assessment of Beijing Lightning Network (BLNET) and Comparison with other lightning location networks across Beijing. Atmospheric Research,197, 76–83.

孙继松，杨波.2006.地形与城市环流共同作用下的 β 中尺度暴雨.大气科学,30（2）：221-234.

Sun Jisong, Yang Bo. Meso-β scale torrential rain affected by topography and the urban circulation. Chinese Journal o f Atmospheric Sciences(in Chinese), 2008, 32(6): 1352～ 1364

孙继松，何娜，郭锐，陈明轩.2013.多单体雷暴的形变与列车效应传播机制，大气科学，37 (1):137-148.

Sun Jisong, He Na, Guo Rui, et al. 2013. The configuration change and train effect mechanism of multi-cell storms [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 37 (1): 137-148.

陶祖钰，赵昕奕.1993.京津冀地区闪电的气候分析[J]. 气象学报, 51(3):325-332.

Tao Z.,X Zhao.1993.Climatological Analysis of Lightning In Beijing-Tianjin- Hebeidistrict.Acta Meteorologica Sinica, 51(3):325-332.

Westcott N E. 1995. Summertime Cloud-to-Ground Lightning Activity around Major Midwestern Urban Areas[J]. Journal of Applied Meteorology, 34(7):1633-1642.

王华,孙继松.2008.下垫面物理过程在一次北京地区强冰雹天气中的作用.气象,34(3): 16-21.

Wang H.,J Sun.,2008.Effeets of Underlying Surfaee Physieal Proeess on a Severe Hail Event Occurred in Beijingr Aea.Meteorologigal Monthly, 34(3): 16-21.

王宇，郄秀书，王东方等.2015.北京闪电综合探测网(BLNET):网络构成与初步定位结果[J]. 大气科学,39(3):571-582.

Wang Yu, Qie Xiushu, Wang Dongfang, et al. 2015. Beijing Lightning NETwork (BLNET): Configuration and preliminary results of lightning location [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 39 (3): 571−582.

Wu F, Cui X, Zhang D L, et al.2016.SAFIR-3000 Lightning Statistics over the Beijing Metropolitan Region during 2005–2007[J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 55(12):2613-2633.

Shao X, Mark Stanley , Amy Regan , Jeremiah Harlin , Morrie Pongratz And M Ichael S Tock. 2006. Total Lightning Observations with the New and Improved Los Alamos Sferic Array (LASA). Journal of Atmospheric And Oceanic Technology. Volume 23,1273-1288.

田野.2017.北京闪电定位网（BLNET ） 算法. 中国科学院大气物理研究所博士学位论文. Tian Y. 2017. Upgrading of Beijing Lightning NETwork (BLNET) and Study on Bipolar Cloud-to-Ground Lightning. Ph. D. dissertation (in Chinese), Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, 132pp.

肖现，王迎春，陈明轩,高峰.2013.基于雷达资料四维变分同化技术对北京地区一次下山突发性增强风暴热动力机制的模拟分析.气象学报, 71 (5): 797–816.

Xiao X.,Y wang.,M Chen.，F Gao.,2013.A mechanism analysis of the thermo-dynamical field of a suddenly intensifying storm from mountains in the Beijing area with the radar data 4Dvar.Acta Meteorologica Sinica, 71 (5): 797–816.

Xiao X., J Sun, M Chen, X Qie, Y Wang and Z Ying. 2017. The characteristics of weakly forced mountain-to-plain precipitation systems based on radar observations and high-resolution reanalysis, J. Geophys. Res. Atmos., 122,doi:10.1002/2016JD025914.

徐燕,孙竹玲,周筠珺等.2018.一次具有对流合并现象的强飑线系统的闪电活动特征及其与动力场的关系.大气科学,42(6):1393-1406.

Xu Yan, Sun Zhuling, Zhou Yunjun, et al. 2018. Lightning activity of a severe squall line with cell merging process and its relationships with dynamic fields [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 42 (6): 1393–1406, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1801.17220.

Yin S., W Li, D Chen, H Jeong, and W Guo, 2011.Diurnal variations of summer precipitation in the Beijing area and the possible effect of topography and urbanization. Adv. Atmos. Sci., 28, 725–734, doi:10.1007/s00376-010-9240-y.

Yuan W., W Sun, H Chen, and R Yu. 2014.Topographic effects on spatiotemporal variations of short-duration rainfall events in warm season of central north China. J. Geophys. Res., 119,11223–11234, doi:10.1002/2014JD022073.

Yang L., F Tian, A. Smith, and H Hu .2014. Urban signatures in the spatial clustering of summer heavy rainfall events over the Beijing metropolitan region, J. Geophys. Res. Atmos., 119, 1203–1217, doi:10.1002/2013JD020762.

Wang Y, X Qie, D Wang, MLiu.2016. Beijing Lightning Network (BLNET): A research and operational system for comprehensive lightning detection,Atmos. Res. Volume 171, 1 May, Pages 121-132.

郑栋，孟青，吕伟涛等.2005.北京及其周边地区夏季地闪活动时空特征分析[J]. 应用气象学报, 16(5):638-644.

Zheng, D., Q. Meng, W. Lü, Y. Zhang, X. Cai, and M. Ma, 2005:Spatial and temporal characteristics of cloud-to-ground lightning in summer in Beijing and its circumjacent regions (in Chinese). Chin. J. Appl. Meteor., 16, 638–644.

Zheng, D., Y. J. Zhang, Q. Meng, W. T. Lu, and X. Y.Yi, 2009.Total lightning characteristics and electric structure evolution in a hailstorm. Acta Meteorolog-ica Sinica, 23(2), 233–249.

周筠珺，张健龙，孙凌.2009. 京津冀地区地闪特征的统计分析[J]. 灾害学,24(1):101-105.

Zhou Y., J Zhang,and L Sun, 2009: Statistic analysis on cloud-to-ground lightning characteristics over Beijing, Tianjin and Hebei Province. J. Catastrophol., 24, 101–105.