

王东方, 郝秀书, 袁善锋, 等. 2020. 北京地区的闪电时空分布特征及不同强度雷暴的贡献 [J]. 大气科学, 44(2): 225–238. WANG Dongfang, QIE Xiushu, YUAN Shanfeng, et al. 2020. Spatial and Temporal Distribution of Lightning Activity and Contribution of Thunderstorms with Different Lightning-Producing Capabilities in Beijing Metropolitan Region [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 44(2): 225–238. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1904.19128

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^{1,2,3} 郝秀书^{1,2} 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} SRIVASTAVA Abhay¹ 刘冬霞¹

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 中国科学院大气物理研究所华北香河全大气层野外科学观测研究站, 河北香河 065400

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 (Surveillance et Alerte Foudre par Interometrie Radioelectrique) 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, 同时参考雷达回波和雷暴持续时间, 将雷暴划分为弱雷暴 (≤ 1000 次)、强雷暴 (> 1000 次且 ≤ 10000 次) 和超强雷暴 (> 10000 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。北京总闪电密度最大值约为 $15.4 \text{ flashes km}^{-2} \text{ a}^{-1}$, 平均值约为 $1.9 \text{ flashes km}^{-2} \text{ a}^{-1}$, 大于 $8 \text{ flashes km}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 的闪电密度高值区基本分布在海拔高度 200 m 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% 和 56%。不同强度雷暴对总雷暴的闪电密度高值中心分布和闪电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 $12 \text{ flashes km}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 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 雷暴 闪电 时空分布 BLNET (Beijing Lightning Network) SAFIR3000 定位网

文章编号 1006-9895(2020)02-0225-14

中图分类号 P411

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1904.19128

Spatial and Temporal Distribution of Lightning Activity and Contribution of Thunderstorms with Different Lightning-Producing Capabilities in Beijing Metropolitan Region

WANG Dongfang^{1,2,3}, QIE Xiushu^{1,2}, YUAN Shanfeng^{1,2}, SUN Zhuling¹, CHEN Zhixiong^{1,2},
LI Jinliang^{1,4}, ZHANG Hongbo¹, LIU Mingyuan^{1,2}, SRIVASTAVA Abhay¹, and LIU Dongxia¹

收稿日期 2019-03-15; 网络预出版日期 2019-05-13

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

通讯作者 郝秀书, E-mail: qiex@mail.iap.ac.cn

资助项目 国家自然科学基金重点项目 41630425, 国际 (地区) 合作与交流项目 41761144074

Funded by National Natural Science Foundation of China (Grant 41630425), International (Regional) Cooperation and Exchange Project (Grant 41761144074)

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

2 School of Earth and Planetary Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

3 Xianghe Observatory of Whole Atmosphere, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Xianghe, Hebei 065400

4 School of Atmospheric Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000

Abstract Based on the lightning data from BLNET (Beijing Lightning Network) and SAFIR3000 (Surveillance et Alerte Foudre par Interometrie Radioelectrique), the spatial and temporal distribution characteristics of lightning flashes produced in 423 thunderstorms in Beijing in seven years are analyzed. According to number of lightning flashes generated by a thunderstorm, and reference both radar echo and thunderstorm duration, the 423 thunderstorms are divided into three categories: weak thunderstorm (≤ 1000 times), strong thunderstorms (1000 to 10000 times), and super thunderstorms (> 10000 times). The contribution of each thunderstorm category to the total lightning flash distribution is analyzed. The average lightning flash density in Beijing is about $1.9 \text{ flashes km}^{-2} \text{ a}^{-1}$, and the maximum is about $15.4 \text{ flashes km}^{-2} \text{ a}^{-1}$, in the southeastern plain region. The area of high lightning flash density greater than $8 \text{ flashes km}^{-2} \text{ a}^{-1}$ is basically distributed in the plain area with altitude below 200 m. Thunderstorms of different intensities contribute differently to the total thunderstorm lightning flashes. The weak thunderstorms are more in number but produce fewer lightning flashes, while the super thunderstorms are fewer but produce more lightning flashes. The lightning flashes generated by super thunderstorms and strong thunderstorms account for 37% and 56% of the total thunderstorm lightning flashes, respectively. Thunderstorms of different intensities have a significant effect on the distribution of high-density lightning flash centers and the characteristics of daily changes in lightning flash. The eastern part of Changping District, the central and eastern parts of Shunyi District, and the main urban area of Beijing are the three high-flash-density regions with a density value greater than $12 \text{ flashes km}^{-2} \text{ a}^{-1}$. The first two high-value centers are greatly affected by the strong thunderstorms, while the high-value center in the urban areas is mainly affected by the super thunderstorms. The frequent lightning activities in the evenings are mainly caused by the super thunderstorms and strong thunderstorms. These two types of thunderstorms are active at night, accounting for 69% and 65% of the total lightning flashes, respectively. The weak thunderstorm lightning activity increases rapidly during the day and contributes greatly to the afternoon lightning activity of the total thunderstorm. In addition, the diurnal variation of lightning activity under different underlying surface conditions varies widely. The lightning activity is more likely to occur during the daytime in the mountainous area, and it increases rapidly in the afternoon, with the main peak appearing at 1800 Beijing time. However, the peak lightning activity in the plain occurs at evenings. The main peaks of the plain and hill regions are delayed by about 1.5 h and 1 h compared with the peak of the mountainous area, respectively.

Keywords Thunderstorm, Lightning flash, Temporal and spatial distribution, BLNET (Beijing Lightning Network), SAFIR3000

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具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 (Westcott, 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 年我国学者就利用有限的闪电定位资料对北京地区的闪电活动进行了研究。郗秀书等 (1990) 利用 1988 年 8 月的闪电定位资料研究发现,北京地区闪电峰值位于北部的燕山山脉和西部太行山脉。陶祖钰和赵昕奕 (1993) 利用 1989 和 1990 年夏季的闪电资料分析京津冀地区的闪电特征,认为闪电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、永定河谷、燕山山地以及天津到德州一线。郑栋等 (2005) 利用 1995~1997 年的闪电资料研究发现闪电的空间

分布主要在北、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 m, 东南平原, 平均海拔在 50 m 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。北京地区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飚线强对流系统, 有时可能会减弱为分散的对流 (孙继松和杨波, 2008; 孙继松等, 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 et al. (2016) 利用 2005~2007 三年的 SAFIR3000 (Surveillance et Alerte Foudre par Interometrie Radioelectrique) 定位网闪电资料 (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: (1) 北京闪电定位网 (BLNET) 稳定运行的四年 (2015~2018 年) 快天线采集的闪电波形资料。(2) SAFIR3000 稳定运行期间的三年 (2005~2007 年) 观测数据, 与 Wu et al. (2016) 所用资料相同。

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 (中国科学院

大气物理研究所) 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到中心站进行处理。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: 工作频段为 1.5 kHz~2 MHz, 时间常数 0.1 ms; (2) 慢天线: 工作频段为 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)。

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, 分别位于怀柔、丰润和永清, 在北京奥运会前后运行良好 (Zheng et al., 2009; Liu et al., 2011)。

BLNET 和 SAFIR3000 两套闪电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 (10 km, 500 ms; 10 km, 1 s), 结果表明, 当采用距离小于 10 km, 时间小于 500 ms 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

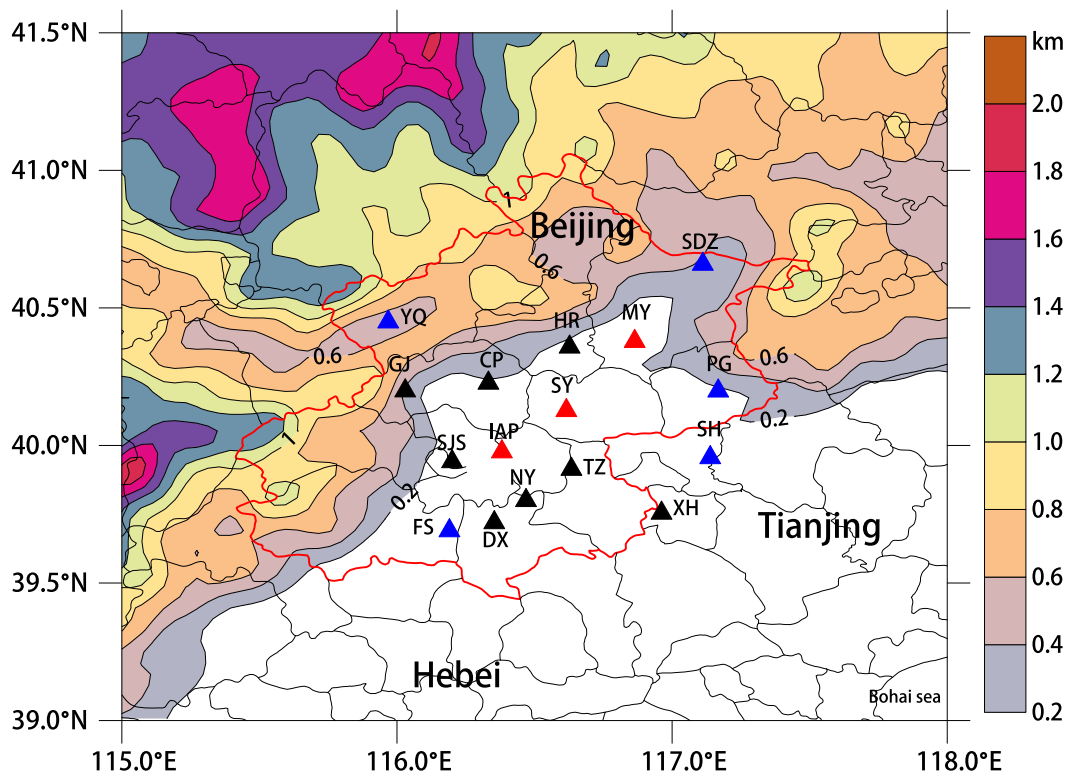


图1 北京闪电定位网 (BLNET) 的测站分布。三角形代表测站位置 (红色三角形表示有快天线、慢天线、磁天线和甚高频天线 4 个传感器; 黑色三角形表示有快天线、慢天线和甚高频天线 3 个传感器; 蓝色三角形表示有快天线、慢天线和磁天线 3 个传感器)。彩色阴影代表海拔高度

Fig. 1 Distribution of BLNET (Beijing Lightning Network) stations. The triangles represent the positions of stations. The red triangles indicate that there are 4 sensors (fast antenna, slow antenna, magnetic antenna, and VHF antenna); the black triangles indicate that there are 3 sensors (fast antenna, slow antenna, and VHF antenna); the blue triangles indicate that there are 3 sensors (fast antenna, slow antenna, and Magnetic antenna). Color shadings represent altitude

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, 参考 Cummins et al. (1998) 的观点, 将闪电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, 闪电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, 分析之前还要进行闪电数据的质量控制。

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 (王宇等, 2015; Wu et al., 2016) 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 50~250 m。因此, 本文选择误差相对较小的区域

(39.0°~41.5°N, 115.0°~118.0°E) 进行研究, 并以 2.5 km×2.5 km 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, 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, 为了解北京及周边地区闪电时

空分布以及不同强度雷暴的贡献, 本文在 Wu et al. (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, 并结合雷达回波和雷暴的持续时间, 将所有雷暴过程分成 3 个强度等级, 分别是弱雷暴 (≤ 1000 次)、强雷暴 (>1000 次和 ≤ 10000 次) 和超强雷暴 (>10000 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, 其中总闪电密度最大值约 $15.4 \text{ flashes km}^{-2} \text{ a}^{-1}$, 平均值约为 $1.9 \text{ flashes km}^{-2} \text{ a}^{-1}$, 大于 $8 \text{ flashes km}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 的闪电密度高值区中心基本分布在海拔高度 200 m 等高线以下的平坦平原地带, 而闪电密度大于 $12 \text{ flashes km}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 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

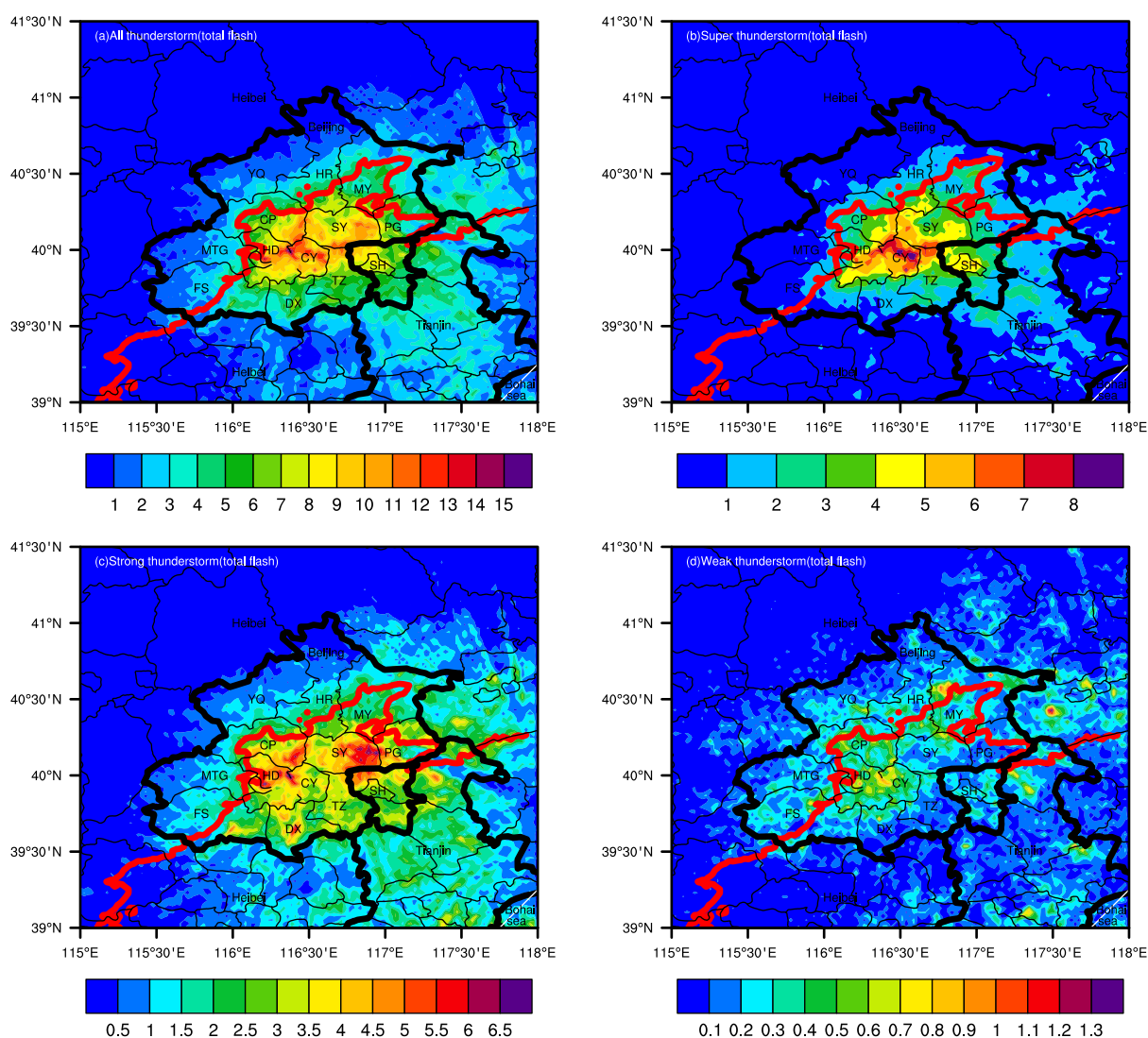


图 2 (a) 总雷暴、(b) 超强雷暴、(c) 强雷暴和 (d) 弱雷暴的总闪电密度 (单位: $\text{flashes km}^{-2} \text{ a}^{-1}$) 的空间分布, 红线为海拔高度 200 m 等高线, 下同

Fig. 2 The density distribution (units: $\text{flashes km}^{-2} \text{ a}^{-1}$) of the total lightning flashes from (a) total thunderstorm, (b) super thunderstorm, (c) strong thunderstorm, and (d) weak thunderstorm. The red line is the 200-m altitude line, the same below

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 $7.0 \text{ flashes km}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 。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, 超强雷暴总闪电密度高值区位置更偏南, 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 $8.9 \text{ flashes km}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 。由图 2d 可见, 相对超强雷暴和强雷暴, 弱雷暴的总闪电密度量级很小, 最大值约为 $1.4 \text{ flashes km}^{-2} \text{ a}^{-1}$, 而且明显高值中心很少, 零星分布在北部山区。总之, 由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闪电时空分布走势, 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。

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闪电密度高值中心(昌平区、顺义区)主要受强雷暴影响, 位置更南的主城区闪电密度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。

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、闪电密度量级相对总闪电高值区小很多, 但是总雷暴的地闪密度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电密度高值区更偏东或者偏南。最大地闪密度约为 $4.8 \text{ flashes km}^{-2} \text{ a}^{-1}$, 平均值约为 $0.6 \text{ flashes km}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 。

不同强度等级的雷暴闪电密度除了空间分布不同, 闪电密度高值区的集中程度也不一样。超强雷暴地闪密度高值区域相对集中, 主要发生在昌平—通州—顺义交界处, 最大闪电密度约为 $3.0 \text{ flashes km}^{-2} \text{ a}^{-1}$, 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 $2.5 \text{ flashes km}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 。弱雷暴产生很少的地闪, 闪电密度最小, 最大值仅为 $0.5 \text{ flashes km}^{-2} \text{ a}^{-1}$, 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定的地区, 导致该地区对应出现闪电密度的极大值, 而强雷暴的次数很多, 但闪电密度的极大值很分散, 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。

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闪电密度的空间分布。与总闪电和地闪相比, 正地闪闪电密度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; 闪电密度量级也更小, 所有雷暴的正地闪闪电密度最大值约为 $0.7 \text{ flashes km}^{-2} \text{ a}^{-1}$, 平均值约为 $0.1 \text{ flashes km}^{-2} \text{ a}^{-1}$, 其中大于 $0.5 \text{ flashes km}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 的高值区主要分布在顺义—通州—三河的交界处和天津北部于桥水库西

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电比例	地闪占总闪电比例	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%

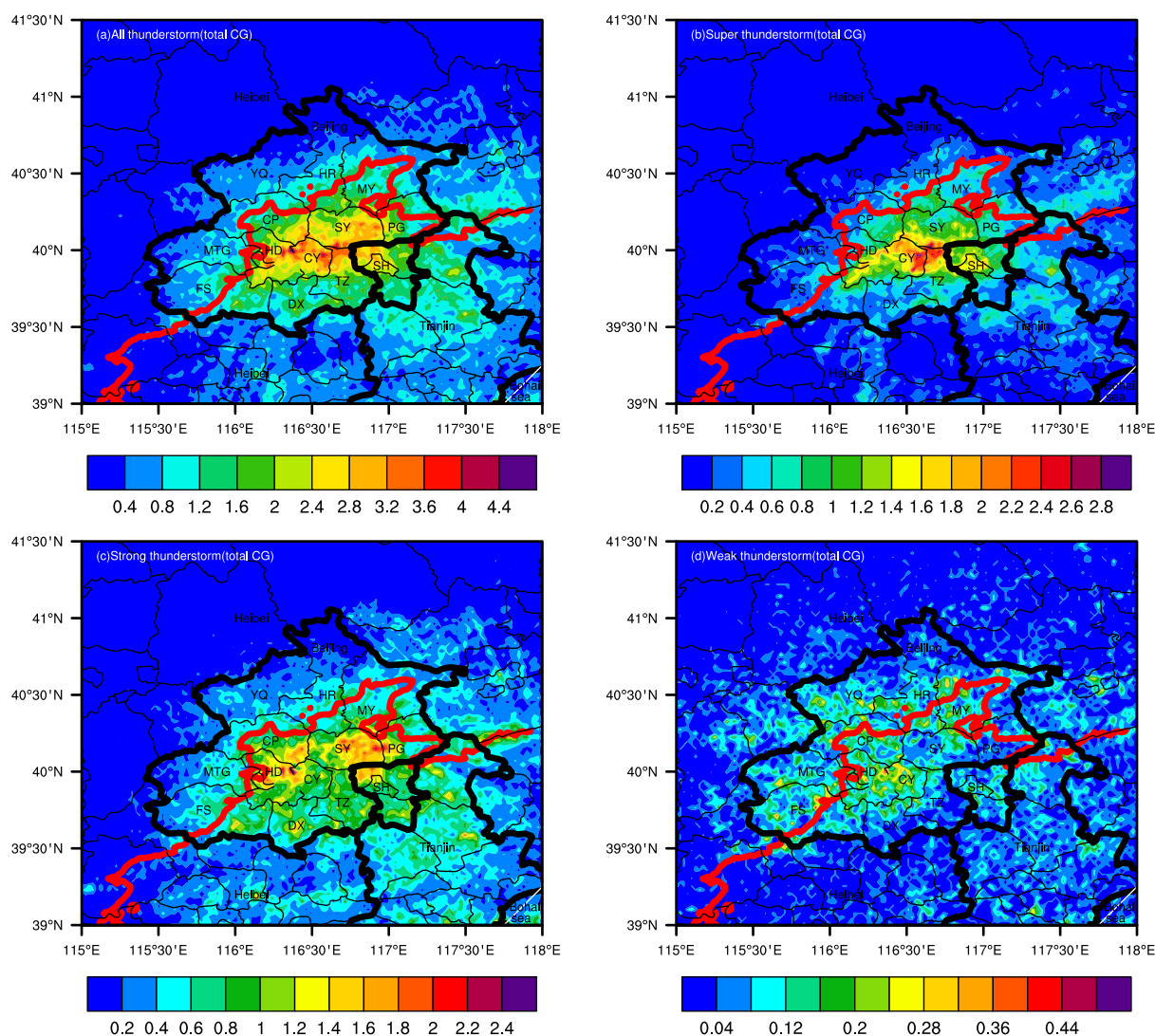


图3 (a) 总雷暴、(b) 超强雷暴、(c) 强雷暴和 (d) 弱雷暴的地闪密度 (单位: $\text{flashes km}^{-2} \text{a}^{-1}$) 的空间分布

Fig. 3 The density distribution (units: $\text{flashes km}^{-2} \text{a}^{-1}$) of cloud to ground (CG) lightning flashes from the (a) total thunderstorm, (b) super thunderstorm, (c) strong thunderstorm, and (d) weak thunderstorm

侧地区。

强雷暴正地闪的闪电密度高值区与总雷暴的分布最一致, 闪电密度的高值中心除了分布在顺义、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 $0.6 \text{ flashes km}^{-2} \text{a}^{-1}$ 。由于超强雷暴的次数很少, 只有两个比较大的正地闪闪电密度高值中心, 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 $0.4 \text{ flashes km}^{-2} \text{a}^{-1}$ 。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 35 dBZ 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。从雷暴正地闪闪电密度高值中心所对应区域和总闪电、地闪闪电密度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。值得注意的是, 正地闪主要的闪电密度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有利于高比例正地闪的发生。

3.4 闪电活动的月变化和日变化特征

图 5a 给出了三个不同雷暴强度等级 (超强雷暴、强雷暴和弱雷暴) 发生次数的月变化。由图 5a 可知, 频繁的雷暴活动主要出现在夏季, 雷暴过程最早出现在 3 月底, 最晚出现在 10 月下旬, 雷暴

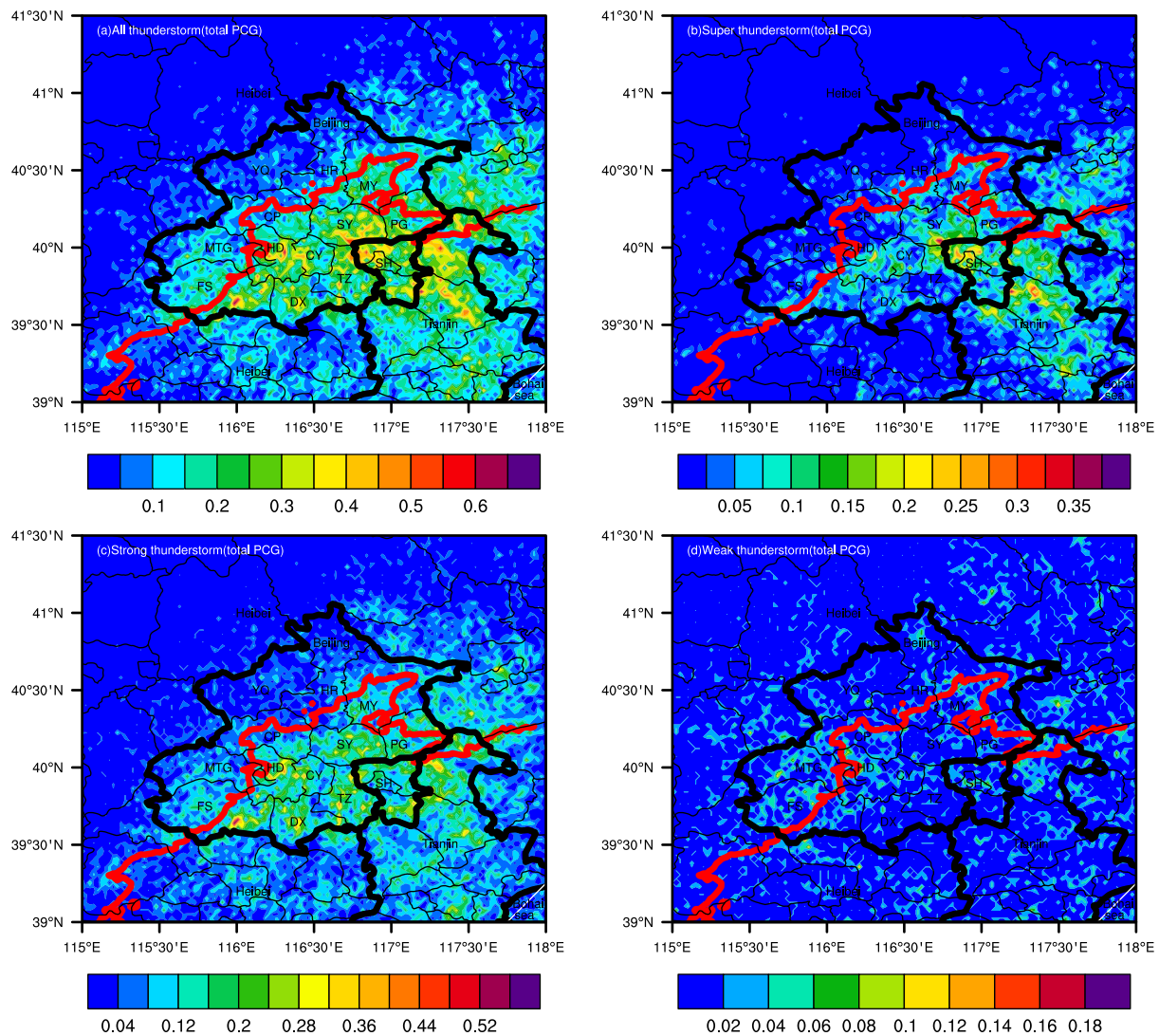


图4 (a) 总雷暴、(b) 超强雷暴、(c) 强雷暴和 (d) 弱雷暴的正地闪密度 (单位: $\text{flashes km}^{-2} \text{a}^{-1}$) 空间分布

Fig. 4 The density distribution (units: $\text{flashes km}^{-2} \text{a}^{-1}$) of positive cloud to ground (PCG) lightning flashes from the (a) total thunderstorm, (b) super thunderstorm, (c) strong thunderstorm, and (d) weak thunderstorm

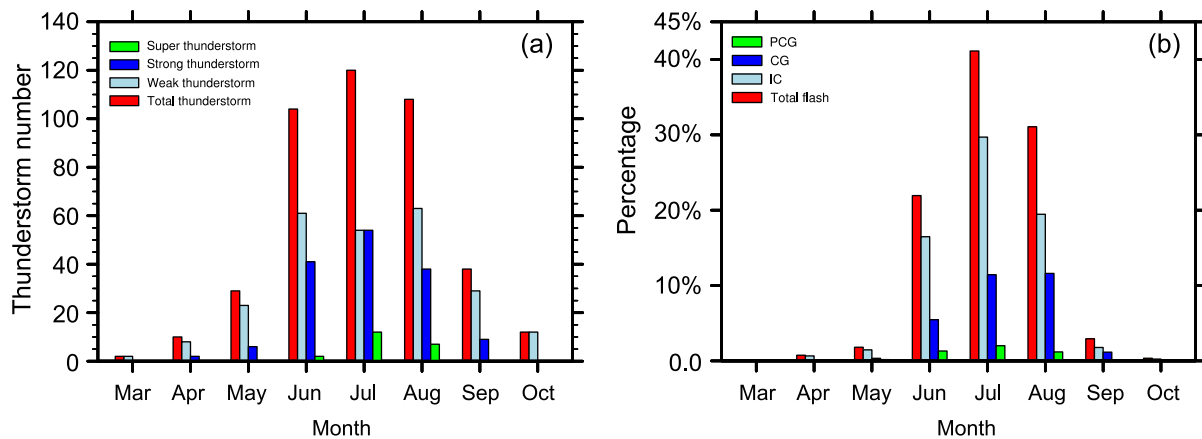


图5 (a) 雷暴发生次数的月变化, (b) 当月闪电次数占全年总闪电次数的百分比

Fig. 5 (a) Monthly change of thunderstorm numbers, (b) percentage of monthly lightning flashes in the total lightning flashes throughout the year. IC represents intracloud lightning flashes

开始月和结束月均以弱雷暴为主, 而强雷暴主要出现在 4~9 月, 超强雷暴多出现在 6~8 月, 以 7 月最多 (57%)。另外, 将闪电区分为云闪、地闪和正地闪, 图 5b 给出了闪电发生次数的月变化。图 5b 的纵坐标代表当月发生的雷暴过程产生的闪电次数占全年雷暴过程产生的所有闪电次数的百分比。由于夏季的 6~8 月雷暴次数最多, 因此也产生了最多的闪电次数, 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, 导致该月总闪电次数所占的全年比例比 6 月份多了约 10%。这表明超强雷

暴产生闪电的效率很高。另外, 由图 5b 可知, 闪电类型中主要以云闪 (IC) 为主, 约占总闪电的约 75%, 而地闪 (CG) 仅占约 25%, 其中正地闪 (PCG) 约仅占总地闪 (CG) 的 13%。

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。图 6 的纵坐标表示每半小时发生的闪电次数占全天总闪电次数的百分比。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 (北京时, 下同), 主峰值出现在晚上 19:00。由图 6b、d 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

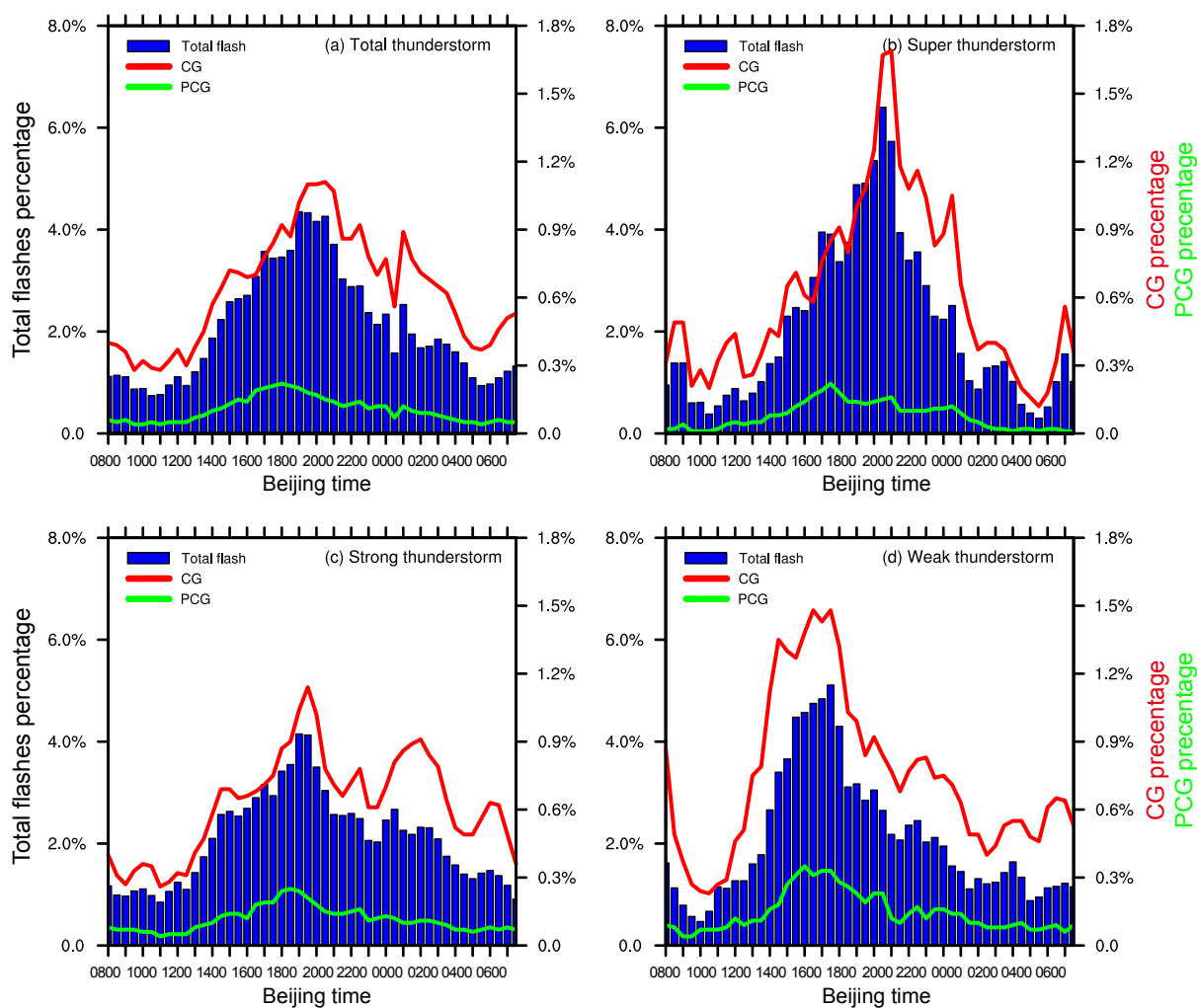


图 6 (a) 总雷暴、(b) 超强雷暴、(c) 强雷暴和 (d) 弱雷暴的总闪电、地闪以及正地闪的日变化。左边纵坐标: 每半小时闪电次数占全天总闪电次数的百分比; 右边纵坐标: 每半小时地闪、正地闪次数占全天总地闪次数的百分比

Fig. 6 Diurnal variation of the total lightning flashes, cloud to ground (CG) lightning flashes, and positive cloud to ground (PCG) lightning flashes from the (a) total thunderstorm, (b) super thunderstorm, (c) strong thunderstorm, and (d) weak thunderstorm. The left y-axis represents percentage of per 0.5-h lightning flashes in total lightning flashes throughout the day; the right y-axis represents percentage of per 0.5-h CG lightning flashes and PCG lightning flashes in total CG lightning flashes throughout the day

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。午后 15:00 左右超强雷暴过程的闪电活动开始逐渐增强, 入夜以后至前半夜闪电活动非常频繁, 总闪电活动在傍晚 17:00 首次出现次峰值, 之后出现一个弱的回落, 18:30 以后闪电活动迅速增强, 夜晚 20:30 出现主峰值, 而后闪电活动开始减弱, 但频繁的闪电活动一直持续至午夜, 次日凌晨 01:00 以后, 闪电活动迅速减弱。与之相反, 弱雷暴的闪电活动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。从总体的趋势上看, 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, 但是闪电活动最频繁的时段和超强雷暴的闪电活动基本一致, 也出现在晚上。晚上强雷暴产生的闪电活动次数约占其总闪电次数的 65%, 但主峰值比超强雷暴早约 1.5 小时 (19:00)。因此, 综合三种不同强度雷暴的闪电活动特征的日变化, 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。

从不同闪电类型总的趋势来看, 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 h, 晚上地闪的主峰值滞后总闪电主峰值约 0.5 h。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 1.0 h, 晚上的地闪主峰值比总闪电主峰值滞后约 0.5 h。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, 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第一个次峰值之后。

根据闪电的日变化特征, 将一天划分为 4 个时

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密度的空间分布特征 (图 7)。由图 7a 可知, 08:00~14:00 闪电密度的高值中心很少, 最大闪电密度约为 $3.5 \text{ flashes km}^{-2} \text{ a}^{-1}$, 平均闪电密度约为 $0.3 \text{ flashes km}^{-2} \text{ a}^{-1}$, 大于 $2.9 \text{ flashes km}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 的中心只有三个, 范围很小, 最大的闪电密度高值区处于顺义东部临近平谷边界, 其他两个闪电密度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的时段。14:00~18:00 时段, 在 200 m 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 $3.7 \text{ flashes km}^{-2} \text{ a}^{-1}$, 平均闪电密度增加到约 $0.5 \text{ flashes km}^{-2} \text{ a}^{-1}$, 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量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 $9.1 \text{ flashes km}^{-2} \text{ a}^{-1}$, 平均闪电密度增加到约 $0.9 \text{ flashes km}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 。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 m 海拔等高线东北—西南走向仍出现闪电密度的高值带, 这表明该时段雷暴活动受地形的抬升作用明显, 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。

根据北京及周边的地形特点, 本文将海拔高度低于 100 m 区域定义为平原, 400 m 以上的区域定义为山区, 100~400 m 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时间均比山区地区滞后约 1.5 h, 比山麓地区晚 0.5 h。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

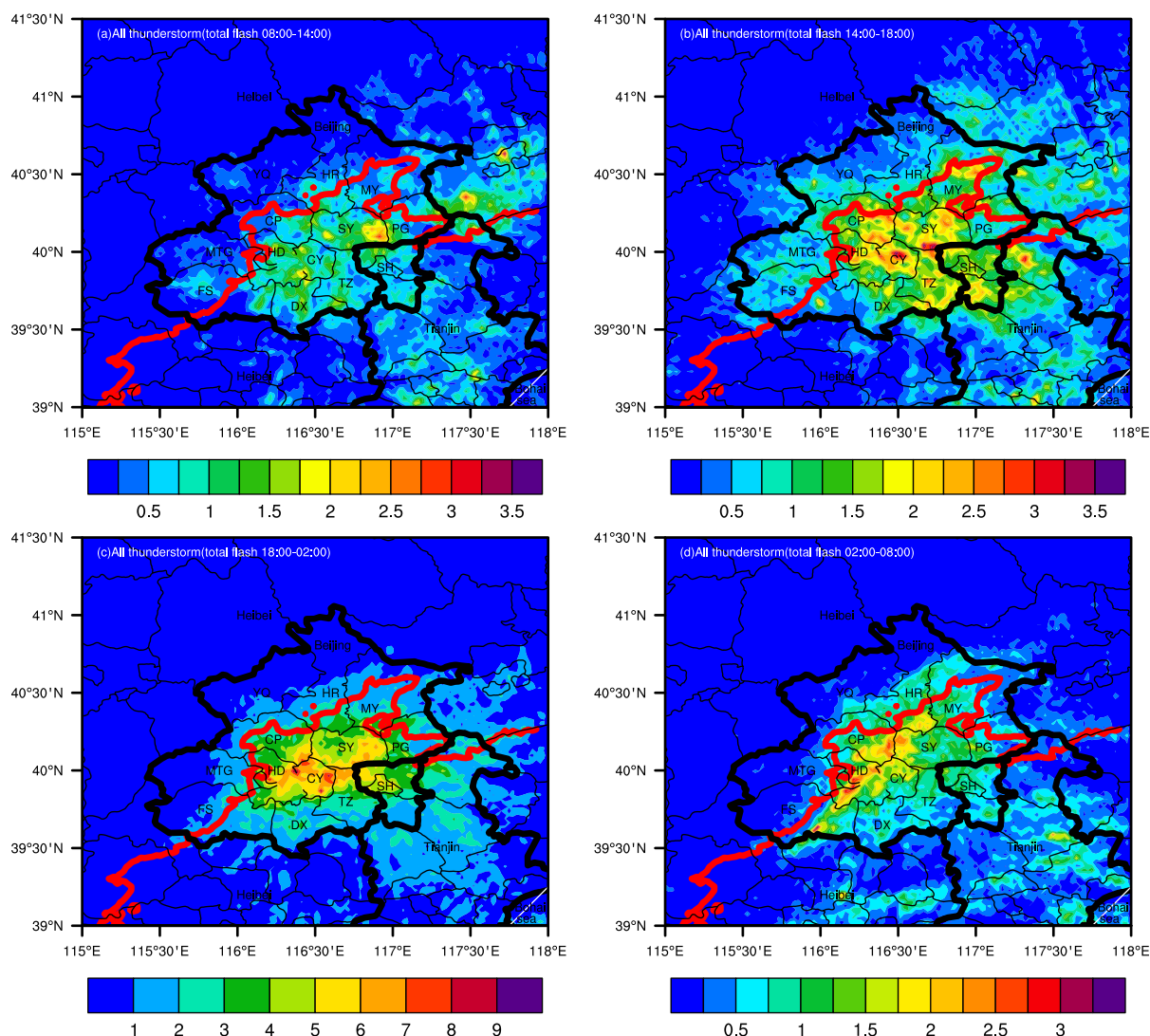


图7 四个时段 (a) 08:00~14:00 (北京时间, 下同)、(b) 14:00~18:00、(c) 18:00~02:00、(d) 02:00~08:00 闪电密度的空间分布 (单位: $\text{flashes km}^{-2} \text{a}^{-1}$)

Fig. 7 Spatial distribution of lightning flashes density (units: $\text{flashes km}^{-2} \text{a}^{-1}$) for (a) 0800–1400 BJT (Beijing time), (b) 1400–1800 BJT, (c) 1800–0200 BJT, (d) 0200–0800 BJT

系统, 山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, 频繁的闪电活动一直持续至次日凌晨。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飚线系统或雷暴群。

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, 结合雷达回波和雷暴的持续时间, 划分为弱雷暴 (≤ 1000 次)、强雷暴 (>1000 次和 ≤ 10000 次) 和超强雷暴 (>10000 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:

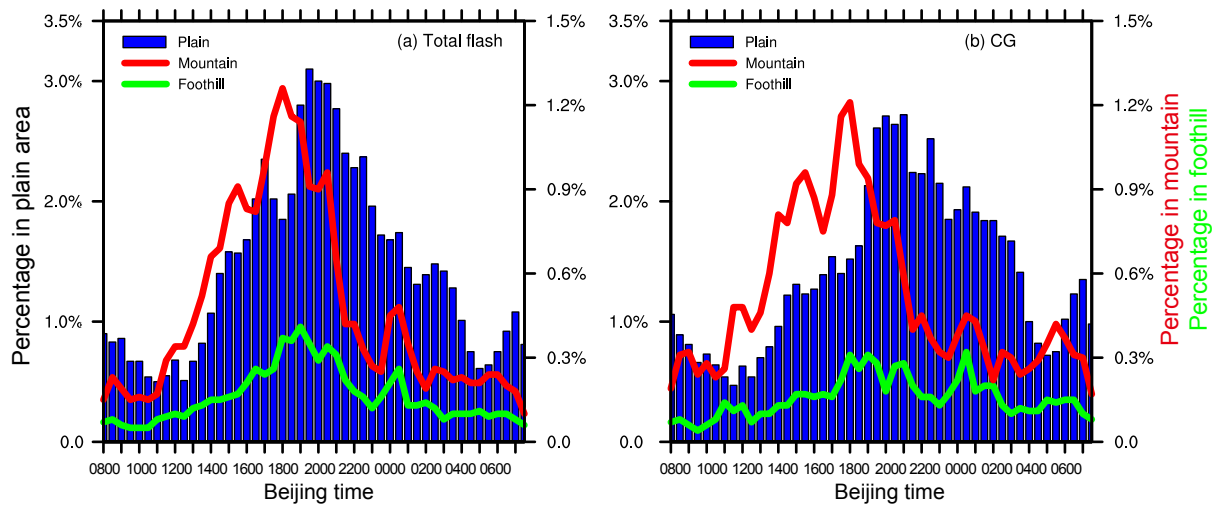


图8 不同下垫面条件下 (a) 总闪电、(b) 地闪电的日变化。左边纵坐标代表平原地区每半小时闪电发生次数占全天总闪电发生次数的百分比; 右边纵坐标代表山区和山麓每半小时发生的地闪次数占全天总地闪发生次数的百分比

Fig. 8 Diurnal changes of the (a) total lightning flashes and (b) CG lightning flashes under different underlying conditions. The left y-axis represents percentage of per 0.5-h lightning flashes in total lightning flashes throughout the day in the plain area; the right y-axis represents percentage of per 0.5-h CG lightning flashes in total CG lightning flashes throughout the day in the mountains and foothills

(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) 提前约 1.5 h 时 (1 h)。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有潜在影响。

之前的研究认为地闪主要集中在北京及周边地区的山区和海滨 (郗秀书等, 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 m 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持续发展和增强 (王华和孙继松, 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,

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 et al., 2010; Koo and Hong, 2010; Yin et al., 2011; Lin et al., 2011; Yuan et al., 2014; Holle and Murphy, 2017; Xiao et al., 2017)。

致谢 感谢所有参与和建设北京闪电网 (BLNET) 的成员, 感谢中国科学院仪器设备功能开发技术创新项目的资助。

参考文献 (References)

- Chen M X, Wang Y C, Gao F, et al. 2012. Diurnal variations in convective storm activity over contiguous North China during the warm season based on radar mosaic climatology [J]. *J. Geophys. Res.*, 117(D20): D20115. doi:10.1029/2012JD018158
- 陈明轩, 王迎春, 肖现, 等. 2012. 基于雷达资料四维变分同化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 [J]. *大气科学*, 36(5): 929–944. Chen M X, Wang Y C, Xiao X, 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. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.11132
- 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]. *J. Geophys. Res.*, 103(D8): 9035–9044. doi:10.1029/98JD00153
- 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, Li H Y. 2005. Preliminary analysis of lightning characteristics in Beijing [J]. *Meteor. Sci. Technol. (in Chinese)*, 33(6): 496–500. doi:10.3969/j.issn.1671-6345.2005.06.004
- Holle R L, Murphy M J. 2017. Lightning over three large tropical lakes and the strait of Malacca: Exploratory analyses [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 145(11): 4559–4573. doi:10.1175/MWR-D-17-0010.1
- 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. doi:10.1016/j.atmosres.2008.09.004
- Koo M S, Hong S Y. 2010. Diurnal variations of simulated precipitation over East Asia in two regional climate models [J]. *J. Geophys. Res.*, 115(D5): 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. doi:10.1016/j.atmosenv.2010.09.027
- 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 X, Song H Y, Xiao W A, et al. 2013. Temporal-spatial characteristics of lightning over Beijing and its circumjacent regions [J]. *Trans. Atmos. Sci. (in Chinese)*, 36(2): 235–245. doi:10.3969/j.issn.1674-7097.2013.02.012
- Lin P F, Chang P L, Jou B J D, et al. 2011. Warm season afternoon thunderstorm characteristics under weak synoptic-scale forcing over Taiwan Island [J]. *Wea. Forecasting*, 26(1): 44–60. doi:10.1175/2010WAF2222386.1
- Liu D X, Qie X S, Xiong Y J, et al. 2011. Evolution of the total lightning activity in a leading-line and trailing stratiform mesoscale convective system over Beijing [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 28(4): 866–878. doi:10.1007/s00376-010-0001-8
- Orville R E, Huffines G, Nielsen-Gammon J, et al. 2001. Enhancement of cloud-to-ground lightning over Houston, Texas [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 28(13): 2597–2600. doi:10.1029/2001GL012990
- 鄧秀书, 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 S, Guo C M, Liu X S. 1990. The characteristics of ground flashes in Beijing and Lanzhou regions [J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 9(4): 388–394.
- Shao X M, Stanley M, Regan A, et al. 2006. Total lightning observations with the new and improved Los Alamos Sferic Array (LASA) [J]. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 23(10): 1273–1288. doi:10.1175/JTECH1908.1
- Srivastava A, Tian Y, Qie X S, et al. 2017. Performance assessment of Beijing Lightning Network (BLNET) and comparison with other lightning location networks across Beijing [J]. *Atmospheric Research*, 197: 76–83. doi:10.1016/j.atmosres.2017.06.026
- 孙继松, 杨波. 2008. 地形与城市环流共同作用下的 β 中尺度暴雨 [J]. *大气科学*, 32(6): 1352–1364. Sun J S, Yang B. 2008. Meso- β scale torrential rain affected by topography and the urban circulation [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 32(6): 1352–1364. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.12015
- 孙继松, 何娜, 郭锐, 等. 2013. 多单体雷暴的形变与列车效应传播机制 [J]. *大气科学*, 37(1): 137–148. Sun J S, He N, Guo R, 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. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.12015
- Surcel M, Berenguer M, Zawadzki I. 2010. The diurnal cycle of precipitation from continental radar mosaics and numerical weather prediction models. Part I: Methodology and seasonal comparison [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 138(8): 3084–3106. doi:10.1175/2010MWR3125.1
- 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 Y, Zhao X Y. 1993. Climatological analysis of lightning in Beijing-Tianjin-Hebei district [J]. *Acta Meteor. Sinica*, 51(3): 325–332. doi:10.11676/qxxb1993.042
- 田野. 2017. 北京闪电定位网 (BLNET) 算法 [D]. 中国科学院大气物理研究所博士学位论文, 132pp. Tian Y. 2017. Upgrading of Beijing lightning network (BLNET) and study on bipolar cloud-to-ground lightning [D]. Ph. D. dissertation (in Chinese), Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, 132pp.
- 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 [J]. *气象*, 34(3): 16–21. Wang H, Sun J S. 2008. Effects of underlying surface physical process on a severe hail event occurred in Beijing area [J]. *Meteorological Monthly (in Chinese)*, 34(3): 16–21.

- doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2008.03.003
- 王宇, 郑秀书, 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 Y, Qie X S, Wang D F, 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. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1407.14138
- Wang Y, Qie X S, Wang D F, et al. 2016. Beijing Lightning Network (BLNET): A research and operational system for comprehensive lightning detection [J]. *Atmos. Res.*, 171: 121–132. doi:10.1016/j.atmosres.2015.12.012
- Westcott N E. 1995. Summertime cloud-to-ground lightning activity around major midwestern urban areas [J]. *J. Appl. Meteor.*, 34(7): 1633–1642. doi:10.1175/1520-0450-34.7.1633
- Wu F, Cui X P, Zhang D L, et al. 2016. SAFIR-3000 lightning statistics over the Beijing metropolitan region during 2005–07 [J]. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 55(12): 2613–2633. doi:10.1175/JAMC-D-16-0030.1
- 肖现, 王迎春, 陈明轩, 等. 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 [J]. *气象学报*, 71(5): 797–816. Xiao X, Wang Y C, Chen M X, et al. 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 [J]. *Acta Meteor. Sinica*, 71(5): 797–816. doi:10.11676/qxxb2013.077
- Xiao X, Sun J Z, Chen M X, et al. 2017. The characteristics of weakly forced mountain-to-plain precipitation systems based on radar observations and high-resolution reanalysis [J]. *J. Geophys. Res.*, 122(6): 3193–3213. 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 [J]. *大气科学*, 42(6): 1393–1406. Xu Y, Sun Z L, Zhou Y J, 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
- Yang L, Tian F Q, Smith J A, et al. 2014. Urban signatures in the spatial clustering of summer heavy rainfall events over the Beijing metropolitan region [J]. *J. Geophys. Res.*, 119(3): 1203–1217. doi:10.1002/2013JD020762
- Yin S Q, Li W J, Chen D L, et al. 2011. Diurnal variations of summer precipitation in the Beijing area and the possible effect of topography and urbanization [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 28(4): 725–734. doi:10.1007/s00376-010-9240-y
- Yuan W H, Sun W, Chen H M, et al. 2014. Topographic effects on spatiotemporal variations of short-duration rainfall events in warm season of central North China [J]. *J. Geophys. Res.*, 119(19): 11223–11234. doi:10.1002/2014JD022073
- 郑栋, 孟青, 吕伟涛, 等. 2005. 北京及其周边地区夏季闪电活动时空特征分析 [J]. *应用气象学报*, 16(5): 638–644. Zheng D, Meng Q, Lü W T, et al. 2005. Spatial and temporal characteristics of cloud-to-ground lightning in summer in Beijing and its circumjacent regions [J]. *Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese)*, 16(5): 638–644. doi:10.3969/j.issn.1001-7313.2005.05.010
- Zheng D, Zhang Y J, Meng Q, et al. 2009. Total lightning characteristics and electric structure evolution in a hailstorm [J]. *Acta Meteor. Sinica*, 23(2): 233–249.
- 郑栋, 张义军, 孟青, 等. 2010. 北京地区雷暴过程闪电与地面降水的相关关系 [J]. *应用气象学报*, 21(3): 287–297. Zheng D, Zhang Y J, Meng Q, et al. 2010. Relationship between lightning activities and surface precipitation in thunderstorm weather in Beijing [J]. *Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese)*, 21(3): 287–297. doi:10.3969/j.issn.1001-7313.2010.03.004
- 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 J L, Sun L. 2009. Statistic analysis on cloud-to-ground lightning characteristics over Beijing, Tianjin and Hebei Province [J]. *Journal of Catastrophology (in Chinese)*, 24(1): 101–105. doi:10.3969/j.issn.1000-811X.2009.01.021