

不同闪电日分布地区气溶胶对闪电活动影响

汪海潮¹, 谭涌波^{1,*}, 师正¹, 郑天雪^{2,3}

1 南京信息工程大学 应急管理学院, 江苏 南京 210044

2 中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室, 中国气象局雷电重点开放实验室, 北京 100081

3 南京气象科技创新研究院, 中国气象科学研究院 - 江苏省气象局, 南京, 210041

摘要 本研究基于 2010-2018 年夏季地闪定位和气溶胶光学厚度 (AOD) 数据, 分析了四川盆地 (区域 1) 和广东地区 (区域 2) 的闪电活动与气溶胶的关系。结果表明, 区域 1 和区域 2 中 AOD 与地闪频次之间的关系都随 AOD 的增加而变化, AOD 的阈值分别为~0.5 和~0.3。当 AOD 低于阈值时, 两个区域的地闪频次均随 AOD 的增加而增加。当 AOD 高于阈值时, 两个区域中地闪频次与 AOD 的关系均变得离散, 但在区域 1 中, 地闪频次整体上仍随 AOD 的增加而增加, 而在区域 2 中, 随着 AOD 的增加, 地闪频次先变化不明显, 之后呈现下降的趋势。区域 1 和区域 2 中闪电活动与气溶胶的关系分别由夜间和下午发生的闪电与气溶胶的关系所决定, 结合气溶胶的辐射抑制作用在白天更强在夜间更弱, 可能导致了高气溶胶含量条件下两个区域闪电活动与气溶胶之间不同的关系。此外, 区域 1 和区域 2 中地闪频次的日分布在各个气溶胶含量条件下分别呈现双峰和单峰的形式, 在较高的气溶胶含量条件下, 区域 1 傍晚的峰值和区域 2 下午的峰值出现时间更迟。

关键词: 闪电活动, 气溶胶, 辐射效应, 日分布

文章编号: 2024048B

DOI: 10.3878/j.issn.1006-9895.2412.24048

收稿日期: 2024-05-08; **网络预出版日期:**

作者简介 汪海潮, 男, 1996 年出生, 博士研究生, 主要从事雷电物理及气溶胶研究. E-mail: whcis4@163.com

通讯作者 谭涌波, E-mail: ybtan@ustc.edu

资助项目 国家自然科学基金面上项目 42275075; 中国气象科学研究院基本科研业务费 2024Y003; 江苏省气象局科研项目 ZD202412; 江苏省研究生科研创新计划 KYCX23_1326; 灾害天气国家重点实验室开放课题 2024LASW-B09.

Funded by The National Natural Science Foundation of China (Grant No. 42275075); the Basic Research Fund of CAMS (2024Y003); the Research Project of Jiangsu Meteorological Bureau (ZD202412); Jiangsu Province Graduate Research Innovation Program (KYCX23_1326); The Open Grants of State Key Laboratory of Severe Weather (2024LASW-B09).

Effects of Aerosols on Lightning Activity in Regions with Different Lightning Diurnal Variations

WANG Haichao¹, TAN Yongbo^{1,*}, SHI Zheng¹, ZHENG Tianxue^{2,3}

1 Nanjing University of Information Science & Technology School of Emergency Management, Nanjing 210044, China

2 State Key Laboratory of Severe Weather & CMA Key Laboratory of Lightning, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China

3 Nanjing Innovation Institute for Atmospheric Sciences, Chinese Academy of Meteorological Sciences–Jiangsu Meteorological Service, Nanjing 210041, China

Abstract This study investigated the relationship between lightning activity and aerosols in the Sichuan Basin (region 1) and Guangdong region (region 2) by analyzing 9-year (2010-2018) summer datasets of cloud-to-ground (CG) lightning and aerosol optical depth (AOD) data. The results indicate that there is a non-linear relationship between AOD and CG lightning flashes in regions 1 and 2, with thresholds of ~0.5 and ~0.3 for AOD, respectively. When AOD is below the threshold, the CG lightning flashes in both regions increase with the increase of AOD. When AOD exceeds the thresholds, the relationship between the CG lightning flashes and AOD becomes scattered in both regions. However, in Region 1, the CG lightning flashes still increases overall with the increase of AOD, while in Region 2, the CG lightning flashes initially shows no significant change and then decreases with the increase of AOD. The relationship between lightning activity and aerosols in regions 1 and 2 is determined by the relationship between lightning and aerosols that occur at night and in the afternoon, respectively. Combined with the radiation suppression effect of aerosols, it is stronger during the day and weaker at night, which may lead to different relationships between lightning activity and aerosols in the two regions under conditions with high aerosol content. In addition, the diurnal variation of CG lightning flashes in regions 1 and 2 shows bimodal and unimodal forms under various aerosol loading, respectively. Under condition with high aerosol loading, the peak in the evening of region 1 and the peak in the afternoon of region 2 appear later.

Keywords Lightning activity, Aerosol, Radiative effects, Diurnal variation

1 引言

气溶胶对闪电活动有着重要的影响,在过去的三十年中,大量的观测研究揭示了气溶胶在全球和区域尺度上对闪电活动的显著影响 (Westcott, 1995; Kar et al., 2014; Altaratz et al., 2017; Thornton et al., 2017; Liu et al., 2021; Wang et al., 2021)。气溶胶通过两种途径影响闪电活动:微物理和辐射效应 (Fan et al., 2016; Kuniyal and Guleria, 2019; 李占清, 2020)。前者指的是气溶胶可以作为云凝结核和冰核,参与雷暴云中的微物理过程,影响雷暴的发展以及云中的电过程 (Rosenfeld et al., 2008; Yuan et al., 2011; Yang et al., 2014; 师正等, 2015; 邓美玲等, 2017; 刘俊等, 2018)。另一方面,辐射效应指的是气溶胶可以通过散射和吸收太阳辐射,调节地气之间的辐射收支,影响雷暴的生成和发展 (Koren et al., 2008; Yang et al., 2013; Tan et al., 2016)。气溶胶的这两种影响往往交织在一起共同影响闪电活动,而它们的强度会受到多种因素的影响,这导致气溶胶与闪电活动之间的关系实际上非常复杂,在不同的地区,气溶胶含量的增加可能会引起闪电活动的增强、不变甚至减弱 (Wang et al., 2018; Lal et al., 2018; Shi et al., 2020; Zhao et al., 2020, 2022)。

气溶胶的影响会受到太阳辐射周期变化的调制,其对对流和闪电活动的影响存在日差异。Chen et al. (2021) 对中国东部地区 2016 至 2017 年 5 到 8 月期间的对流云与气溶胶的关系进行了小时尺度的分析,结果表明,在污染条件下,上午时段对流云的发生频率更高,而下午则相反。Wang et al. (2023) 针对四川盆地的研究发现,在气溶胶含量较高的条件下,气溶胶会抑制下午发生的闪电活动,但对夜间发生的闪电活动仍表现出促进的影响。通过对比模式和观测的结果, Ten Hoeve et al. (2012) 发现亚马逊地区生物质燃烧产生的气溶胶在夜间通过微物理效应增加云量和云光学厚度,而在白天则通过辐射效应减少云量。Wu et al. (2011) 通过对南美地区深对流和降水活动的日变化进行模拟发现,烟尘气溶胶的辐射作用减少了下午的深对流数量,缩小了深对流数量日循环的幅度。Guo et al. (2016) 发现在珠江三角洲地区,污染条件下的闪电活动峰值滞后于清洁条件,通常出现在下午更晚的时间。这可能是因为在污染条件下,下午气溶胶的辐射抑制作用更为显著,抑制并推迟了雷暴的发生,直至傍晚气溶胶辐射抑制影响减弱时 (Lee et al., 2016)。

综上所述,气溶胶对闪电活动的影响是复杂的,存在显著的日差异,那么在具有不同闪电活动日分布特征的地区,气溶胶与闪电活动之间的关系是怎样的,有什么差异? 中国地区

夏季的闪电活动普遍在下午达到高峰，而在地形条件复杂的地区，如中国北部和西南部分区域，闪电活动则更倾向于在夜间发生（袁铁和郗秀书, 2004; Xia et al., 2015）。为了探究上述问题，本文选取了分别以夜间和下午闪电活动为主的四川盆地和广东地区作为研究区域，利用 9 年（2010-2018）地闪定位和气溶胶数据，探讨气溶胶在这两个区域中与闪电活动关系的差异。

2 数据介绍与方法

2.1 数据选择与来源

本文使用的闪电数据来源于中国国家闪电定位网探测得到的地闪定位数据。该网络由地基 ADTD（Advanced Time of Arrival and Direction）系统进行地闪定位，其单个探测器的平均探测半径可达 300 公里，探测网的探测精度约为 300 米，探测效率介于 82%至 90%之间。随着近年来探测站点数量的增加，该定位网的探测范围已经能够覆盖中国中部和东部绝大部分地区（Yang et al., 2015）。该闪电定位数据能够提供每次地闪的发生时间、位置（经纬度）、极性和峰值电流信息。本文对地闪定位数据进行了质量控制，考虑到一次闪电可能有多个辐射源被探测并被记录，本文参照前人的处理方法，将时间间隔小于 0.5s 且水平距离差小于 10 公里的记录视为同一次地闪，以第一个记录作为该次地闪的定位结果（Cummins et al., 1998）。此外，为了减少云闪被误记为地闪的情况，本文去除了峰值电流小于 15kA 的正极性地闪记录。

本文采用气溶胶光学厚度（Aerosol Optical Depth，以下简称 AOD）来衡量气溶胶的含量。使用的 AOD 数据源自于美国国家航空航天局（NASA）提供的 MERRA-2（Modern Era Retrospective Analysis for Research and Applications, version 2）大气再分析数据集。该数据集涵盖了多种类型的气溶胶信息，包括总气溶胶、硫酸盐气溶胶、黑炭气溶胶、沙尘气溶胶以及有机碳气溶胶等。本文选取其中的逐小时总气溶胶 AOD 数据，该数据的水平空间分辨率为 $0.5^{\circ} \times 0.625^{\circ}$ 。MERRA-2 是美国航天局（NASA）全球模拟和同化办公室（GMAO）利用戈达德地球观测系统模型（GEOS）为卫星时代制作的全球大气再分析的最新版本。该数据集吸收了来自中分辨率成像光谱辐射计（MODIS）、海上高级甚高分辨率辐射计（AVHRR）、亮表面上的天基多角度成像光谱辐射计（MISR）和地基气溶胶自动探测网络（AERONET）的 AOD（Buchard et al., 2017）。Su et al.（2023）利用 AERONET 测量数据评估了 MERRA-2 中 AOD 的日变化精度，发现 MERRA-2 中的 AOD 与 AERONET 测量的 AOD 在白天和夜间均显示出良好的一致性。许多先前的研究（Zhao et al., 2020; Pan et al.,

2022; Liu et al., 2024) 已经使用 MERRA-2 的气溶胶产品来分析气溶胶对闪电活动、对流和降水的影响。除此之外, 本文还选取了地面温度 (Surface Temperature, ST) 数据, 该数据来自于欧洲中尺度气象预报中心 (ECMWF) 发布的全球大气再分析数据集: ERA-5, 其水平空间分辨率为 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ 。

2.2 研究区域选择

本文选择四川盆地地区 (28°N - 32°N , 103°E - 107°E) 和广东地区 (22°N - 25°N , 112°E - 116°E) 作为研究区域, 为方便描述, 下文中分别简称区域 1 和区域 2 (图 1 中黑框所示区域)。图 1 给出了两个研究区域在 2010-2018 夏季期间的平均 AOD 和日均地闪频次的空间分布。可以发现, 区域 1 和区域 2 都具有较高的 AOD 值 (图 1a), 其均值分别达到了 0.47 和 0.37, 这表明两个研究区域内都有较高的气溶胶含量。人类活动的排放是这两个区域中气溶胶的重要来源, 而区域 1 被高山环绕, 地形闭塞, 更加不利于该地区气溶胶的扩散, 导致该区域 1 相较于区域 2 具有更高的气溶胶含量。区域 1 和区域 2 相较于周边地区都有更高的地闪频次 (图 1b), 其日均地闪频次分别为 6.2 次/天和 9.1 次/天, 表明两个研究区域都有较为活跃的闪电活动。区域 1 和区域 2 有着显著不同的闪电活动日分布特征 (如图 2 所示)。区域 1 特殊的地形和环流背景条件使得该地区夏季白天大气更稳定, 不易生成对流, 而在夜间对流活动更活跃, 这造成区域 1 的闪电活动集中发生在傍晚和夜间, 区域 2 中夏季主要以太阳辐射驱动的热力雷暴为主, 因此闪电活动集中发生在下午 (Jin et al., 2013; Zhang et al., 2019; 黄楚惠等, 2020; Li et al., 2021; 竹利等, 2024)。

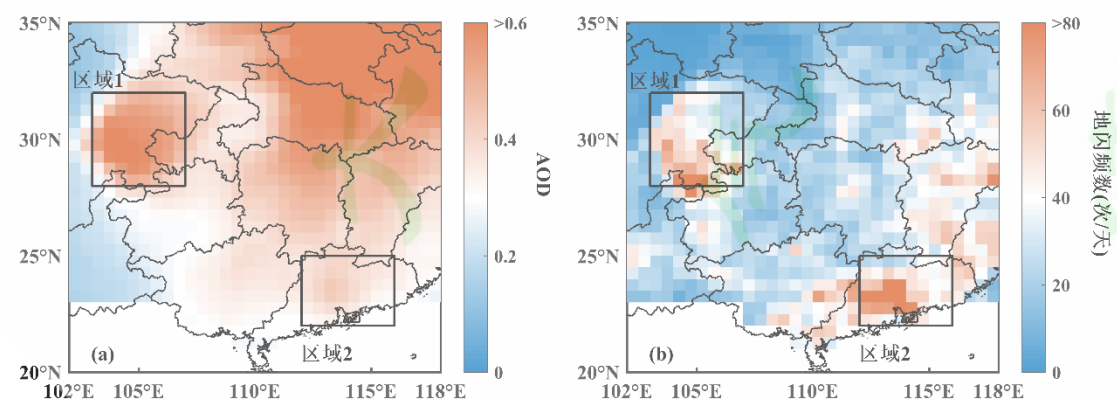


图 1 研究区域平均 (a) AOD 和 (b) 地闪频次空间分布。图中数据的空间分辨率为 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ 。区域 1 和区域 2 所在位置分别以黑框标出。

Fig. 1 The spatial distribution of mean (a) AOD and (b) CG lightning flashes. The locations of region 1 and region 2 are marked by black rectangles.

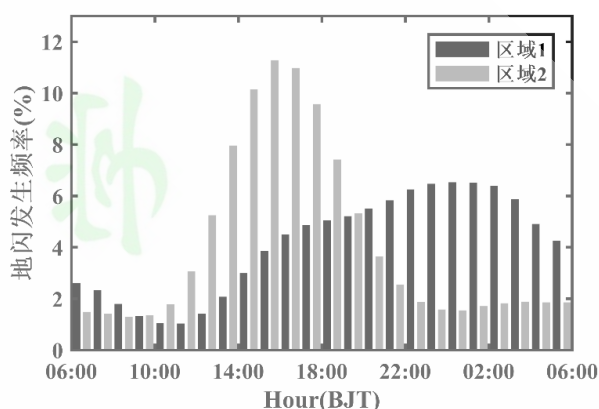


图2 区域1和区域2中地闪的日分布。

Fig. 2 The diurnal variations of CG lightning flashes in region 1 and region 2

2.3 数据处理与方法

本文研究的时间范围是 2010-2018 年，考虑到两个研究区域的闪电活动主要集中在夏季（6、7 和 8 月），并为了减小季节变化对结果的干扰，本文仅选取夏季的数据进行分析。在本文中，定义上午的 6:00 至次日上午的 6:00（北京时，以下简称 BJT）为一天，将有地闪记录的一天记为一个样本。计算每个样本时间范围内的累计地闪频数、区域平均 AOD 和 ST 作为该样本各项参数的数值。此外，参考已有的研究（Kaufman et al., 2005; Koren et al., 2008; Wang et al., 2018; Wang et al., 2023），AOD 值过高可能会影响其测量的准确性，本文去除了 AOD 值超过 0.8 的样本，经过筛选，最终在区域 1 和区域 2 中分别得到 734 和 765 个有效样本。本文采用 Pearson 线性相关性系数 (r) 来定量描述两个参数之间的线性关系，当两个参数的线性相关性显著性水平 (p) 小于 0.05 时，认为它们之间的相关性在统计上是显著的。

3 分析结果

3.1 日总地闪频次与 AOD 的关系

本节对两个研究区域日总地闪频次与 AOD 的关系进行分析。为减小大量样本所带来的数据离散性，首先依据 AOD 值将样本以 0.1 的间隔划分为 7 组，随后将每组内的样本依据 AOD 值进行排序，并平均分为 5 组，进一步计算每组样本中的地闪频次和 AOD 的均值以及误差范围，最终得到的地闪频次和 AOD 的关系如图 3 所示。

从图 3 可以看出，区域 1 和区域 2 中地闪频次与 AOD 的关系分别在 $AOD \sim 0.5$ 和 $AOD \sim 0.3$ 处出现变化。在拐点之前，两个区域中的地闪频次都随着 AOD 的增加而增加，而当 AOD 超过拐点值时，地闪频次与 AOD 的关系变得离散，但整体上，区域 1 中的地闪

频次仍随 AOD 的增加而增加，区域 2 中的地闪频次则随 AOD 的增加先平缓变化，随后降低。为了更直观的对比两个区域中地闪频次与 AOD 的关系，分别计算了两个区域地闪频次与 AOD 整体以及拐点前后的相关性系数 r 和显著性水平 p ，结果如表 1 所示。区域 1 中的地闪频次与 AOD 整体上呈现正相关的关系，其线性相关系数为 0.74，当 AOD 小于 0.5 时，二者的相关性有所增强 ($r=0.79$)，而当 AOD 超过 0.5 时，相关性有所下降 ($r=0.45$)。在区域 2 中，地闪频次与 AOD 整体上呈现正相关 ($r=0.54$) 的关系，当 $AOD<0.3$ 时，地闪频次与 AOD 之间的相关性变高 ($r=0.91$)，但当 $AOD>0.3$ 时，二者的相关性显著减弱 ($r=0.12$)。

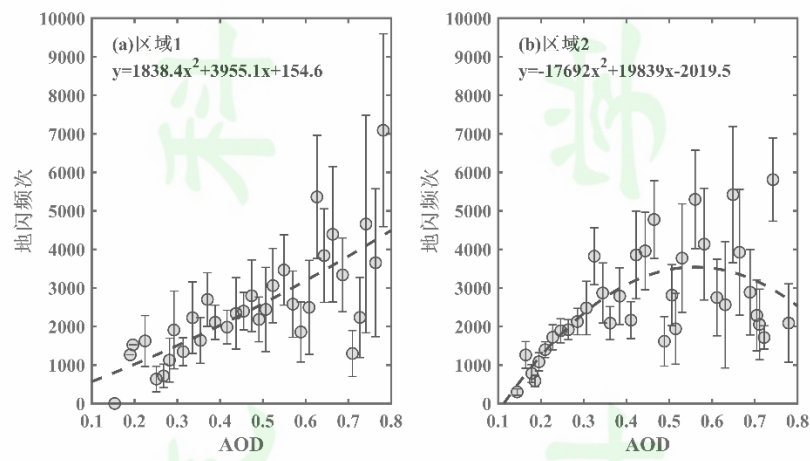


图 3 (a) 区域 1 和 (b) 区域 2 中地闪频次与 AOD 的关系，虚线代表二者的二次拟合曲线。

Fig. 3 Relationship between CG lightning flashes and AOD in (a) region 1 and (b) region 2. The dashed line in each panel represents the quadratic fitting curve between them.

表 1 地闪频次与 AOD 的线性相关性系数和显著性水平

Table 1 The correlation coefficients and significance level between CG lightning flashes and AOD.					
区域 1	r	p	区域 2	r	p
整体	0.74	<0.01	整体	0.54	<0.01
AOD<0.5	0.79	<0.01	AOD<0.3	0.91	<0.01
AOD>0.5	0.45	0.08	AOD>0.3	0.12	0.57

区域 1 和区域 2 中气溶胶与闪电活动之间的这种非线性的关系在其他地区的研究中也有报道，例如北京地区（孙萌宇等, 2020）、非洲北部和南部地区（Wang et al., 2018）、亚马逊地区（Altaratz et al., 2010）等。造成这种现象的原因可能是在气溶胶含量较低条件下，气溶胶的微物理效应起主要作用，促进闪电活动，而随着气溶胶含量的增加，气溶胶的辐射效应逐渐增强，与气溶胶微物理效应叠加，气溶胶对闪电活动的影响变得更加复杂，造成了二者的关系变得离散。为了验证这一猜想，图 4 给出了两个区域中地面温度与 AOD 的关系。

气溶胶的辐射效应会减少达到地面的太阳辐射，从而降低地面温度，从图 4 可以看出，随着 AOD 的增加，两个区域中的地面温度都呈现降低的趋势，这表明在高气溶胶含量的条件下，两个区域中的气溶胶都有更强的辐射效应。

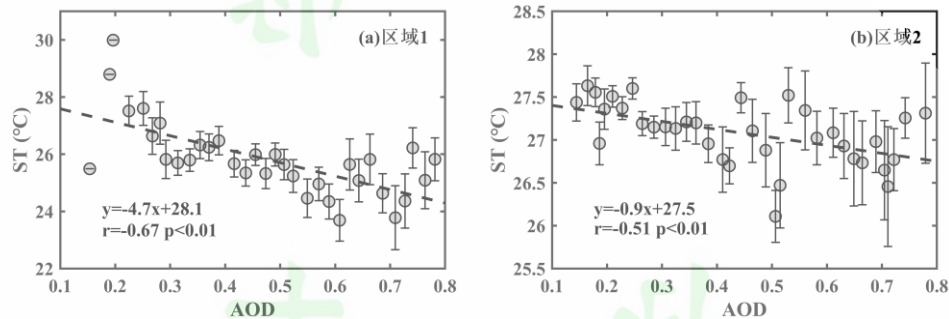


图 4 (a) 区域 1 和 (b) 区域 2 中 ST 与 AOD 的关系，虚线代表二者的一次拟合直线。

Fig. 4 Relationship between ST and AOD in (a) region 1 and (b) region 2. The dashed line in each panel represents the linear fitting between them.

值得注意的是，在区域 1 中，当气溶胶含量超过拐点值之后，地闪频次整体上仍随 AOD 的增加而增加。这表明相比于区域 2，在高气溶胶含量条件下，区域 1 中气溶胶辐射效应对闪电活动的抑制作用更弱，整体上气溶胶对闪电活动仍起着促进的影响。考虑到区域 2 的闪电活动主要集中在下午和傍晚，而区域 1 的闪电活动则多发生在更迟的傍晚和夜间，这是否是导致区域 1 中高气溶胶含量条件下气溶胶对闪电活动的辐射抑制作用更弱的原因？在下一节中对此进行进一步的分析。

3.2 不同时段地闪频次与 AOD 的关系

本节对一天不同时段内地闪频次与 AOD 的关系进行分析。将一天以 3 小时为间隔分为 8 个时段，每个时段中两个研究区域内地闪频次与该时段内 AOD 值的关系如图 5 所示。可以发现，区域 1 中闪电活动活跃的开始时间相较于区域 2 更迟，区域 2 在午后地闪频次开始增多，持续到傍晚，随后减少，而区域 1 则在下午晚些时候地闪频次开始增加，持续到后半夜开始减少。区域 1 中地闪频次最多的前三个时段出现在傍晚和夜间（18:00~03:00 BJT），在这些时段中地闪频次与 AOD 的关系与图 3 中给出的二者整体关系一致，而区域 2 中地闪频次最多的前三个时段位于下午和傍晚（12:00~21:00 BJT），同样的，在这些时段中地闪频次与 AOD 的关系也与图 3 中给出的二者整体关系一致。

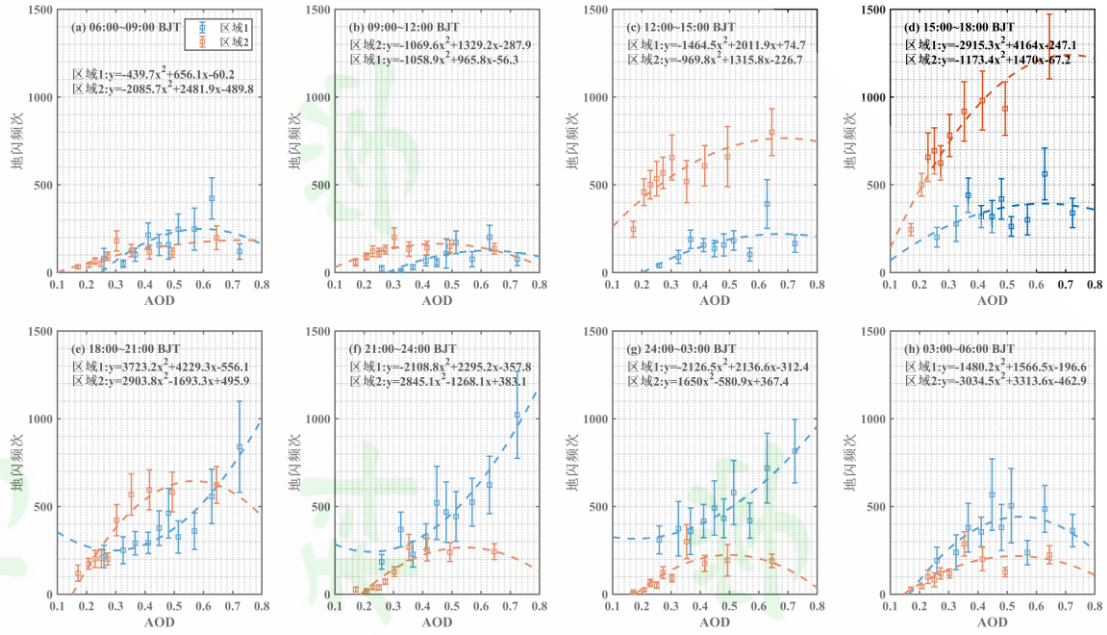


图5 不同时段内区域1和区域2中地闪频次与AOD的关系，图中的虚线代表二者的二次拟合曲线。

Fig. 5 Relationship between CG lightning flashes and AOD in region 1 and region 2 at different time periods. The dashed line in each panel represents the quadratic fitting curve between them.

为了更直观地对比不同时间段内地闪频次与AOD之间的关系，本文分别计算了两个研究区域在AOD拐点值前后，每个时段内地闪频次与AOD拟合直线的斜率及相关性系数，结果如图6所示。可以发现，区域1中地闪频次较多的夜间，地闪频次与AOD拟合直线的斜率在AOD拐点前后均较大且为正值，并且二者都呈正相关的关系。在区域2中，在闪电活动集中的下午，地闪频次与AOD拟合直线的斜率在AOD拐点前更大且为正，二者呈正相关的关系，但当AOD超过拐点值后，下午时段地闪频次与AOD拟合直线的斜率接近零，且二者之间没有明显的相关性。值得注意的是，在AOD低于各自的拐点值时，两个区域中所有时段内的地闪频次与AOD均呈现正相关的关系，且大多数情况都通过了显著性检验，这表明在低气溶胶含量的条件下，气溶胶的微物理效应在全天各个时段都对闪电活动有稳定的促进作用。相反，当AOD超过各自的拐点值时，地闪频次与AOD的相关性普遍降低，且大多数情况下未通过显著性检验，这表明在高气溶胶含量条件下，气溶胶微物理效应与辐射效应的叠加影响削弱了闪电活动与气溶胶之间的联系。

图5和图6的结果表明区域1中闪电活动与气溶胶之间的整体关系主要由傍晚至夜间发生的闪电活动与气溶胶的关系所决定，区域2则主要由更早的时段（下午至傍晚）发生的闪电活动与气溶胶的关系决定，而气溶胶在白天对闪电活动的辐射抑制作用相较于傍晚和夜间更强，这可能导致了区域1和区域2主要时段内闪电活动与气溶胶不同的关系，并最终造成

了图 3 中两个区域中二者在整体关系上的差异。

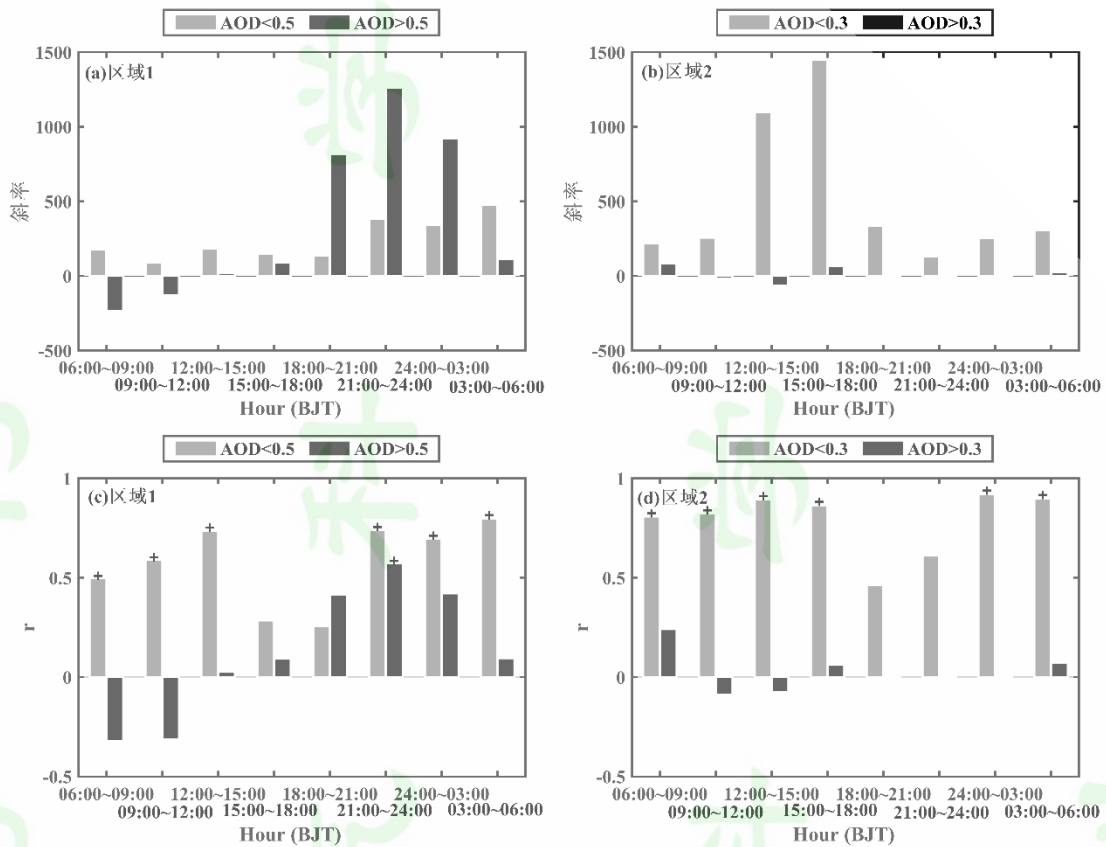


图 6 不同时段内地闪频次与 AOD 拟合直线的斜率 (a, b) 以及二者的相关性系数 (c, d)。“+”号代表二者的相关性通过 0.05 的显著性检验。

Fig. 6 (a, b) The slope of the fitting line between CG lightning flashes and AOD at different time periods. (c, d) The correlation coefficient between them at different periods. Plus signs denote those correlation coefficient that pass the significant test of 0.05.

3.3 地闪频次的日分布特征对 AOD 的响应

3.1 和 3.2 节对两个研究区域中地闪频次与 AOD 的整体关系进行了分析, 除此之外, 气溶胶的改变是否会对这两个区域中地闪频次的日分布特征产生影响? 本节对此进行分析。

将样本依据 AOD 值从小到大排序, 平均分为三组, 以 AOD 的大小分别定义为清洁组、中等组和污染组, 分别计算得到每组每小时的平均地闪频次, 得到地闪频次在三种气溶胶条件下的日分布, 结果如图 7 所示。区域 1 中地闪频次的日分布在三种气溶胶条件下都呈现双峰形式, 分别在傍晚和午夜后各出现一个峰值。但是, 在污染条件下, 傍晚的峰值与其后的谷值相差不大, 并且峰值出现的时间更迟, 地闪频次整体的分布形式更接近以夜间峰值为主的单峰形式。在区域 2 中, 三种气溶胶条件下地闪频次的日分布均呈现以下午峰值为主的单峰形式。

峰形式，污染情况下峰值出现的时间要滞后于其他两种情况约 1 小时。

区域 1 和区域 2 中地闪频次的日分布特征在三种气溶胶条件下的变化并不大，这可能是由于闪电活动的日分布主要受到热力-动力因素的控制，气溶胶在其中的影响有限。但值得注意的是，区域 1 和区域 2 在傍晚和下午的地闪频次峰值时间在污染条件下都滞后于其他条件，这与 Guo et al. (2016) 在珠江三角洲发现的结果类似，这可能是因为气溶胶的辐射效应对对流活动的抑制作用在下午早些时候更强，而在傍晚和夜间减弱，污染条件下的气溶胶可以通过其辐射抑制作用抑制下午早些时候的对流活动，推迟至更晚的时候发生。

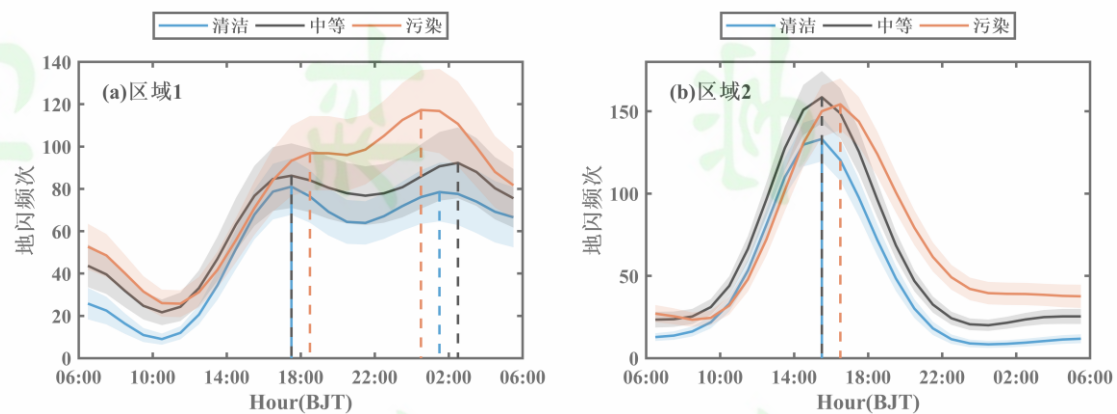


图 7 区域 1 和区域 2 在不同气溶胶条件下的地闪频次日分布。

Fig. 7 The diurnal variations of CG lightning flashes in region 1 and region 2 with different aerosol loadings.

4 结论与讨论

本文结合地闪定位数据和气溶胶数据，选择以夜间闪电活动为主的四川盆地地区（区域 1）和以下午闪电活动为主的广东地区（区域 2）为研究区域，分析了不同闪电活动日分布背景下气溶胶与闪电活动的关系，得到如下主要结论：

（1）区域 1 和区域 2 中闪电活动与气溶胶含量的关系随气溶胶含量的增加而变化，闪电活动与气溶胶关系的拐点分别出现在 $AOD \sim 0.5$ （区域 1）和 $AOD \sim 0.3$ （区域 2）处。在拐点之前，两个区域中的地闪频次都随 AOD 的增加而增加。在拐点之后，气溶胶与闪电活动之间的关系变得离散，区域 1 中的地闪频次整体上仍然随 AOD 的增加而增加，而区域 2 中的气溶胶对闪电活动的影响变得不明显，地闪频次随着 AOD 的增加先平缓变化，随后降低。这可能是由于拐点之前，气溶胶含量较低，其微物理效应占主导作用，对闪电活动主要起促进的作用，而在拐点之后，气溶胶含量增多，其辐射效应增强，与微物理效应叠加共同影响闪电活动，增加了闪电活动与气溶胶之间关系的不确定性。

（2）区域 1 和区域 2 中闪电活动与气溶胶的关系分别由夜间和下午发生的闪电与气溶胶的关系所主导，这可能是导致气溶胶在超过拐点值后对区域 1 和区域 2 闪电活动表现出不

同影响的原因。气溶胶的辐射效应对闪电活动的抑制作用在白天更强夜间更弱，因此在高气溶胶条件下，气溶胶辐射效应对以夜间闪电活动为主的区域 1 中的闪电活动的抑制影响可能更小，这导致区域 1 中的气溶胶在超过拐点后仍然以微物理效应的影响为主，整体上仍对闪电活动表现出促进的作用，而在以下午闪电活动为主的区域 2，受到气溶胶辐射效应抑制作用的影响更大，使得区域 2 中的气溶胶在超过拐点后，其微物理效应与辐射效应的影响彼此抵消，造成闪电活动与气溶胶之间不明显的关系。

(3) 气溶胶对区域 1 和区域 2 中的闪电活动日分布特征有一定的影响，在气溶胶较高的条件下，区域 1 傍晚和区域 2 下午的闪电活动峰值出现时间会推迟约 1 小时，这可能是因为气溶胶的辐射效应抑制并推迟了下午闪电活动的发生。

在大多数已有的研究中，气溶胶在其超过拐点之后对闪电活动没有明显的影响或者表现出抑制的作用 (Koren et al., 2008; Altaratz et al., 2010; Proestakis et al., 2016; Wang et al., 2018; Dayeh et al., 2021)，即与区域 2 中的结果类似，而与这些研究不同的是，区域 1 中，在气溶胶较高的条件下闪电活动仍然与气溶胶呈正相关的关系。这可能是因为过去的研究中大多考虑的是一天的总闪电数量，且选择的研究区域多以白天闪电活动为主，尤其是热带地区，如非洲、亚马逊地区等，闪电活动主要受热力因素的驱动，因此在气溶胶含量较高的条件下闪电活动更容易受到气溶胶辐射抑制作用的影响。此外，Fan et al. (2015) 的研究指出，四川盆地地区白天的气溶胶辐射效应增加了盆地大气的稳定程度，使得大量的水汽和湿对流不稳定能量累积到夜间，在动力因素的驱动下会产生更强的对流活动，这也可能是造成区域 1 夜间气溶胶与闪电活动正相关关系的原因之一。

总的来说，本文以气溶胶和闪电活动的关系为出发点，探讨了不同闪电活动日分布地区气溶胶对闪电活动影响的差异，结果表明在以夜间闪电活动为主的地区，不论在低或者高气溶胶条件下，气溶胶都对闪电活动呈现出促进的作用，而在以白天闪电活动为主的地区，在气溶胶较低的条件下，气溶胶对闪电活动呈现促进的作用，而在气溶胶较高的条件下，气溶胶与闪电活动的关系变得不明显，甚至对闪电活动呈现抑制的影响。但是，应该指出的是，闪电活动同样会受到各类热力-动力因素的影响，并且观测数据能够给出的信息有限，难以反映气溶胶与闪电活动背后的具体物理机理，因此在未来的工作中，还需要引入更多环境参量，并借助模式模拟的手段，进一步分析气溶胶对白天和夜间闪电活动影响的具体机制以及差异。

参考文献 (References)

Altaratz O, Koren I, Yair Y. et al. 2010. Lightning response to smoke from Amazonian fires[J]. Geophysical

Research Letters, 37(7): L07801, doi:10.1029/2010GL042679

Altaratz O, Kucienska B, Kostinski A. et al. 2017. Global association of aerosol with flash density of intense lightning[J]. Environmental Research Letters, 12(11): 114037, doi:10.1088/1748-9326/aa922b

Buchard V, Randles C A, da Silva A M. et al. 2017. The MERRA-2 Aerosol Reanalysis, 1980 Onward. Part II: Evaluation and Case Studies[J], Journal of Climate, 30: 6851–6872, doi:10.1175/JCLI-D-16-0613.1

Chen T M, Li Z Q, Kahn R A. et al. 2021. Potential impact of aerosols on convective clouds revealed by Himawari-8 observations over different terrain types in eastern China[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 21: 6199–6220, doi:10.5194/acp-21-6199-2021

Cummins K L, Murphy M J, Bardo E A. et al. 1998. A combined TOA/MDF technology upgrade of the US National Lightning Detection Network[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 103(D8): 9035–9044, doi:10.1029/98JD00153

邓美玲, 银燕, 赵鹏国, 等. 2017. 云凝结核浓度对雷暴云电过程影响的数值模拟研究[J]. 大气科学, 41(1): 106–120. Deng Meiling, Yin Yan, Zhao Pengguo, et al. 2017. Effects of cloud condensation nuclei concentration on the electrification of thunderstorm: A numerical simulation[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 41 (1): 106–120, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1608.15286

Fan J W, Wang Y, Rosenfeld D. et al. 2016. Review of aerosol–cloud interactions: Mechanisms, significance, and challenges[J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 73(11): 4221–4252, doi:10.1175/JAS-D-16-0037.1

Guo J P, Deng M J, Lee S S. et al. 2016. Delaying precipitation and lightning by air pollution over the Pearl River Delta. Part I: Observational analyses[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 121(11): 6472–6488, doi: 10.1002/2015JD023257

黄楚惠, 李国平, 牛金龙, 等. 2022. 2020 年 8 月 10 日四川庐山夜发特大暴雨的动热力 结构及地形影响[J]. 大气科学, 46(4): 989–1001. HUANG Chuhui, LI Guoping, NIU Jinlong, et al. 2022. Dynamic and Thermal Structure and Topographic Impact of the Night Torrential Rainfall in Lushan, Sichuan on August 10, 2020[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 46(4): 989–1001. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2205.21205

Jin X, Wu T W, Li L. 2013. The quasi-stationary feature of nocturnal precipitation in the Sichuan Basin and the role of the Tibetan Plateau[J]. Climate Dynamics, 41: 977–994, doi: 10.1007/s00382-012-1521-y

Kar S K, Liou Y A. 2014. Enhancement of cloud-to-ground lightning activity over Taipei, Taiwan in relation to urbanization[J]. Atmospheric research, 147: 111–120, doi:10.1016/j.atmosres.2014.05.017

Kaufman Y J, Koren I, Remer L A. et al. 2005. The effect of smoke, dust, and pollution aerosol on shallow cloud

- development over the Atlantic Ocean[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 102(32): 11207–11212, doi: 10.1073/pnas.05051911102
- Koren I, Martins J V, Remer L A. et al. 2008. Smoke invigoration versus inhibition of clouds over the Amazon[J]. *science*, 321(5891): 946–949, doi:10.1126/science.1159185
- Kuniyal J C, Guleria R P. 2019. The current state of aerosol-radiation interactions: A mini review[J]. *Journal of Aerosol Science*, 130: 45–54, doi:10.1016/j.jaerosci.2018.12.010
- Lal D M, Ghude S D, Mahakur M. et al. 2018. Relationship between aerosol and lightning over Indo-Gangetic Plain (IGP), India[J]. *Climate dynamics*, 50: 3865–3884, doi:10.1007/s00382-017-3851-2
- Lee S S, Guo J P, Li Z Q. 2016. Delaying precipitation by air pollution over the Pearl River Delta: 2. Model simulations[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 121(19): 11–739, doi:10.1002/2015JD024362
- Liu Y K, Williams E, Li Z W. et al. 2021. Lightning enhancement in moist convection with smoke-laden air advected from Australian wildfires[J]. *Geophysical Research Letters*, 48(11): e2020GL092355, doi:10.1029/2020GL092355
- Liu F, Rosenfeld D, Pan Z X. et al. 2024. Combined effects of fine and coarse marine aerosol on vertical raindrop size distribution[J]. *npj Climate and Atmospheric Science*, 7(1): 182, doi:10.1038/s41612-024-00730-1
- 刘俊, 谭涌波, 师正, 等. 2018. 气溶胶对雷暴云微物理过程和起电影响的数值模拟[J]. *气候与环境研究*, 23(6): 758–768. Liu Jun, Tan Yongbo, Shi Zheng, et al. 2018. A numerical study of aerosol effects on microphysical process and electrification in thunderstorms[J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 23 (6): 758-768, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2018.18047
- 李占清. 2020. 气溶胶对中国天气、气候和环境影响综述[J]. *大气科学学报*, 43(1): 76-92. Li Zhanqing. 2020. Impact of aerosols on the weather, climate and environment of China: an overview[J]. *Transaction of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 43(1): 76–92, doi:10.13878/j.cnki.dqkxxb.20200115005
- Li J, Li Y Q, Zhao T L. et al. 2021. Northeastward propagation of nocturnal precipitation over the Sichuan Basin[J]. *International Journal of Climatology*, 41: E2863–E2879, doi:10.1002/joc.6886
- Pan Z X, Mao F Y, Rosenfeld D. et al. 2022. Coarse sea spray inhibits lightning[J]. *Nature Communications*, 13(1): 4289, doi:10.1038/s41467-022-31714-5
- Proestakis E, Kazadzis S, Lagouvardos K. et al. 2016. Lightning activity and aerosols in the Mediterranean region[J]. *Atmospheric research*, 170: 66–75, doi:10.1016/j.atmosres.2015.11.010
- Rosenfeld D, Lohmann U, Raga G B. et al. 2008. Flood or drought: how do aerosols affect precipitation?[J]. *science*, 321(5894): 1309–1313, doi:10.1126/science.1160606
- Shi Z, Wang H C, Tan Y B. et al. 2020. Influence of aerosols on lightning activities in central eastern parts of

China[J]. Atmospheric Science Letters, 21(2): e957, doi:10.1002/asl.957

师正, 谭涌波, 唐慧强, 等. 2015. 气溶胶对雷暴云起电以及闪电发生率影响的数值模拟[J]. 大气科学, 39(5):

941–952. Shi Zheng, Tan Yongbo, Tang Huiqiang, et al. 2015. A Numerical Study of Aerosol Effects on the Electrification and Flash Rate of Thunderstorms[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 39(5): 941–952, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1412.14230

孙萌宇, 郅秀书, 刘冬霞, 等. 2020. 北京地区闪电活动与气溶胶浓度的关系研究[J]. 地球物理学报, 63(5):

1766–1774. Sun Mengyu, Qie Xiushu, Liu Dongxia, et al. 2020. Analysis of potential effects of aerosol on lightning activity in Beijing metropolitan region[J]. Chinese journal of Geophysics (in Chinese), 63(5): 1766–1774, doi:10.6038/cjg2020N0095

Tan Y B, Peng L, Shi Z. et al. 2016. Lightning flash density in relation to aerosol over Nanjing (China)[J]. Atmospheric Research, 174: 1–8, doi:10.1016/j.atmosres.2016.01.009

Ten Hoeve J E, Jacobson M Z, Remer L A. 2012. Comparing results from a physical model with satellite and in situ observations to determine whether biomass burning aerosols over the Amazon brighten or burn off clouds[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 117: D08203, doi:10.1029/2011JD016856

Thornton J A, Virts K S, Holzworth R H. et al. 2017. Lightning enhancement over major oceanic shipping lanes[J]. Geophysical Research Letters, 44(17): 9102–9111, doi:10.1002/2017GL074982

Wang Q Q, Li Z Q, Guo J P. et al. 2018. The climate impact of aerosols on the lightning flash rate: is it detectable from long-term measurements?[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 18(17): 12797–12816, doi:10.5194/acp-18-12797-2018

Wang H C, Shi Z, Wang X J. et al. 2021. Cloud-to-ground lightning response to aerosol over air-polluted urban areas in China[J]. Remote Sensing, 13(13): 2600, doi:10.3390/rs13132600

Wang H C, Tan Y B, Shi Z. et al. 2023. Diurnal differences in the effect of aerosols on cloud-to-ground lightning in the Sichuan Basin[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 23(4): 2843–2857, doi:10.5194/acp-23-2843-2023

Westcott N E. 1995. Summertime cloud-to-ground lightning activity around major Midwestern urban areas[J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 34(7): 1633–1642, doi:10.1175/1520-0450-34.7.1633

Wu L T, Su H, Jiang J H. 2011. Regional simulations of deep convection and biomass burning over South America: 2. Biomass burning aerosol effects on clouds and precipitation[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 116: D17209, doi:10.1029/2011JD016106

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, 54(12): 2443–2460,

doi:10.1175/JAMC-D-15-0029.1

Yang X, Yao Z Y, Li Z Q. et al. 2013. Heavy air pollution suppresses summer thunderstorms in central China[J].

Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 95: 28–40, doi:10.1016/j.jastp.2012.12.023

Yang X, Li Z Q. 2014. Increases in thunderstorm activity and relationships with air pollution in southeast China[J].

Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 119(4): 1835–1844, doi:10.1002/2013JD021224

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

袁铁, 郅秀书. 2004. 卫星观测到的我国闪电活动的时空分布特征[J]. 高原气象, 023(004):488-494. Yuan Tie,

Qie Xiushu. 2004. Spatial and temporal distribution of lightning activities in China from satellite observation[J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 023(004): 488–494

Yuan T, Remer L A, Pickering K E. et al. 2011. Observational evidence of aerosol enhancement of lightning

activity and convective invigoration[J]. Geophysical Research Letters, 38: L04701, doi:10.1029/2010GL046052

Zhang Y H, Xue M, Zhu K F. et al. 2019. What is the main cause of diurnal variation and nocturnal peak of

summer precipitation in Sichuan Basin, China? The key role of boundary layer low-level jet inertial oscillations[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 124(5): 2643–2664, doi:10.1029/2018JD029834

Zhao P G, Li Z Q, Xiao H. et al. 2020. Distinct aerosol effects on cloud-to-ground lightning in the plateau and

basin regions of Sichuan, Southwest China[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 20(21): 13379–13397, doi:10.5194/acp-20-13379-2020

Zhao P G, Zhang Y Y, Liu C. et al. 2022. Potential relationship between aerosols and positive cloud-to-ground

lightning during the warm season in Sichuan, southwest China[J]. Frontiers in Environmental Science, 10: 945100, doi:10.3389/fenvs.2022.945100

竹利, 蒋兴文, 卢萍, 等. 2024. 雅安地区一次暖区暴雨过程的对流触发机制分析[J]. 大气科学, 48(5):

1693–1710. ZHU Li, JIANG Xingwen, LU Ping, et al. 2024. Analysis of the Convective Triggering Mechanism of A Warm-Sector Rainstorm in the Ya'an Region[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 48(5): 1693–1710. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2311.23074