

吴啸天, 王晓妍, 郑栋, 等. 不同类型气溶胶对长三角地区地闪活动影响. 应用气象学报, 2023, 34(5): 608-618.

DOI: 10.11898/1001-7313.20230509

不同类型气溶胶对长三角地区地闪活动影响

吴啸天^{1)*} 王晓妍¹⁾ 郑栋²⁾ 张义军¹⁾

¹⁾(复旦大学大气与海洋科学系, 上海 200438)

²⁾(中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室, 北京 100081)

摘 要

利用 2015—2021 年 4—9 月中国气象局全国地闪定位网的地闪观测资料与 MERRA2 气溶胶光学厚度再分析资料, 分析长江三角洲及其周边地区 (27.5°~35°N, 115°~122.5°E) 地闪活动与不同类型气溶胶的关系。结果表明: 不同类型气溶胶与地闪活动的关系不同, 有地闪日的硫酸盐气溶胶光学厚度更高, 无地闪日的沙尘气溶胶光学厚度更高, 地闪多发生在硫酸盐气溶胶光学厚度较高且沙尘气溶胶光学厚度较低的环境中。当硫酸盐气溶胶光学厚度低于阈值时, 在一定相对湿度条件下地闪密度与硫酸盐气溶胶光学厚度为正相关关系, 当硫酸盐气溶胶光学厚度高于阈值时, 地闪密度有减小的趋势或趋势不明显, 且不同月份的阈值不同。因此, 气溶胶的云微物理作用与辐射效应的叠加使得气溶胶与地闪活动的关系更为复杂, 而沙尘气溶胶与地闪密度在 4—6 月呈负相关关系, 7—9 月相关不显著。

关键词: 地闪活动; 气溶胶; 云微物理作用

引 言

闪电是一种发生于雷暴云中的强烈放电现象, 闪电活动产生的大电流、高电压、强电磁辐射等效应会对人们的生命财产安全带来威胁^[1-3]。大量统计分析和模拟试验指出气溶胶是影响闪电活动的重要因素。气溶胶能够作为云凝结核以及冰核影响云中微物理过程的发展, 进而影响闪电活动的发生^[4-6]。区域研究发现气溶胶浓度升高会造成闪电活动增加^[7-8]。Altaratz 等^[9]基于全球闪电定位系统 (World Wide Lightning Location Network, WWLLN) 观测资料研究发现气溶胶浓度较高时, 强闪电密度较大。除此之外, 大量研究还关注城市气溶胶对闪电活动的影响^[10-13]。Wang 等^[14]对我国成都、武汉、济南 3 个城市的研究发现气溶胶浓度较高时, 闪电密度较大, 而正地闪比例较小。以上研究均表明, 气溶胶能够促进闪电活动的发生。

除了作为云凝结核参与云微物理过程, 气溶胶还能够散射、吸收太阳辐射^[15-16], 导致到达地面的辐射通量减小, 大气层结更为稳定, 不利于对流活动发生。有的研究认为随着气溶胶浓度不断增加, 气溶胶的辐射作用渐渐加大, 可与微物理作用抵消甚至表现出抑制闪电活动^[17]。Tan 等^[18]指出夏季南京气溶胶光学厚度与闪电密度呈负相关, 进一步分析气溶胶与对流有效位能等的关系发现这可能是由气溶胶的辐射作用导致。Du 等^[19]的研究指出在气溶胶浓度较低的地区, 气溶胶浓度与闪电密度呈正相关, 在气溶胶浓度较高的地区, 二者呈负相关。Zhao 等^[20]对比气溶胶浓度较高的四川盆地与气溶胶浓度较低的高原地区闪电活动的研究也支持以上结果。孙萌宇等^[21]利用总闪资料以及 PM_{2.5} 资料针对北京地区研究也得到类似结论: 当气溶胶浓度低于 130 $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 时, 两者呈正相关, 但当气溶胶浓度超过 150 $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 时, 两者呈负相关。这些研究结果体现了气溶胶与闪电活动关系的复杂性。

2023-04-03 收到, 2023-06-12 收到再改稿。

资助项目: 国家自然科学基金项目 (42175090)

* 邮箱: 22113020028@m.fudan.edu.cn

气溶胶类型多样,不同类型的气溶胶具有不同的物理性质,不同类型气溶胶的微物理作用及辐射作用不尽相同,研究认为不同类型的气溶胶对于闪电活动的影响有所不同。Sun 等^[22]对 2021 年北京的一次沙尘暴过程的分析表明,沙尘气溶胶可能通过增加冰核等方式加剧闪电活动并导致正地闪比例提升。Wang 等^[23]对比非洲两处分别被沙尘气溶胶和烟尘气溶胶控制地区的闪电指出,当气溶胶光学厚度(aerosol optical depth, AOD)较低时,两个区域的闪电数随 AOD 的增大急剧上升,但当 AOD 超过 0.3 后,沙尘气溶胶控制区的闪电数随 AOD 增大而减小,但烟尘气溶胶控制区闪电数变化不明显,这可能是由两个地区主导的气溶胶性质不同所致。Pan 等^[24]研究海洋上气溶胶与闪电活动的关系指出,可能由于海盐气溶胶直径较大,易产生较大云滴,加速暖雨过程,导致闪电活动减弱。

综上所述,气溶胶对闪电活动的影响复杂,气溶胶种类以及环境条件均可对二者关系产生较大影响,同时二者关系在不同地区也存在差异,因此它们之间的关系仍需进一步研究。国内已有研究往往集中单一城市,仅有少量研究关注地区^[25],为了解长江三角洲(简称长三角)及其周边地区气溶胶与地闪活动的关系,本文通过地基地闪定位资料,气溶胶光学厚度资料以及大气再分析资料,研究长三角及周边地区地闪活动与气溶胶的相关性,揭示不同类型气溶胶与地闪活动的关系。

1 资料与研究方法

1.1 资料简介

中国气象局全国地闪定位探测系统集成到了到达时间差和磁定向方法(advanced time of arrival and direction, ADTD)。ADTD 探测系统通过多站测量地闪回击辐射的电磁场确定电流参数,利用时差法结合磁向法对地闪进行定位。该系统能提供地闪发生时间、经纬度、极性和峰值电流等信息。自 2009 年 ADTD 探测系统基本能够覆盖中国中部及东部的绝大多数地区^[26]。ADTD 地闪定位资料需要进行质量控制和归闪处理,剔除参与定位的站点数小于 5 和电流强度小于 10 kA 的地闪定位资料,因为系统常常将近距离的云闪误判为正地闪。将时间间隔小于 0.5 s,空间距离小于 10 km 的地闪定位资料归为同一地闪。本文利用 ADTD 资料,研究 2015—

2021 年长三角及周边地区(27.5°~35°N, 115°~122.5°E)地闪活动与气溶胶的关系。

MERRA2(the modern-era retrospective analysis for research and applications, version 2)资料集是美国国家航空航天局提供的再分析资料^[27]。本文使用 MERRA2 气溶胶再分析资料,包含大气气溶胶、硫酸盐气溶胶、沙尘气溶胶、海盐气溶胶、有机碳气溶胶等的光学厚度和散射系数,资料水平分辨率为 0.625°×0.5°,时间分辨率为小时,空间范围及时间范围与地闪资料相同。长三角地区气溶胶以硫酸盐气溶胶为主(0.361, 约占 70%),有机碳(0.061)、黑碳(0.035)以及沙尘气溶胶(0.041)对大气气溶胶 AOD(0.513)的贡献相近,本文选用沙尘气溶胶和硫酸盐气溶胶讨论不同类型气溶胶对地闪的影响。

ERA5 是由欧洲中期天气预报中心提供的第 5 代全球大气再分析资料,通过同化系统将模式产品与观测资料结合,以获得多种大气和气候变量、陆地和海洋状态参数逐小时最佳估计。研究指出 ERA5 再分析资料代表性更好^[28],因此得到广泛应用。由于地闪活动受多种热力-动力因素影响,本文探究相对湿度对气溶胶影响地闪活动的原因。

统计分析前统一各类资料的时空分辨率,时间分辨率为逐日,水平分辨率插值为 0.5°×0.5°。

1.2 研究方法

地闪活动和气溶胶浓度均具有明显的季节变化和空间分布特征,为排除季节和空间位置的影响,首先将单一格点在该月份每日 AOD 由高到低排序,比较 AOD 最高的 10%与最低的 10%情况的地闪密度差异,无地闪日则不统计。利用 Pearson 线性相关系数定量描述变量间线性相关关系的强弱。

2 结果分析

2.1 气溶胶光学厚度和地闪密度时空分布

2015—2021 年长三角及其周边地区平均地闪密度、大气 AOD、硫酸盐 AOD 以及沙尘 AOD 的空间分布如图 1 所示。由图 1 可见,地闪密度的空间分布呈纬向分布,且随纬度升高而递减,高值中心位于浙江沿海与江西部分丘陵地区,低值中心位于皖西北。硫酸盐 AOD 与大气 AOD 的空间分布较为类似,结合 AOD 大小可知长三角地区以硫酸盐气溶胶为主。大气 AOD 大致呈西北向东南递减的趋

势, 低值中心出现在浙江与福建两省交界处, 这可能与其位置靠近武夷山区和海洋有关, 安徽部分山区(大别山与黄山)大气 AOD 相较于周边区域偏低, 海

洋地区大气 AOD 相较于陆地地区偏低。沙尘 AOD 呈纬向分布, 随纬度升高递增, 但 AOD 较小。

图 2 为 2015—2021 年长三角及周边地区逐月

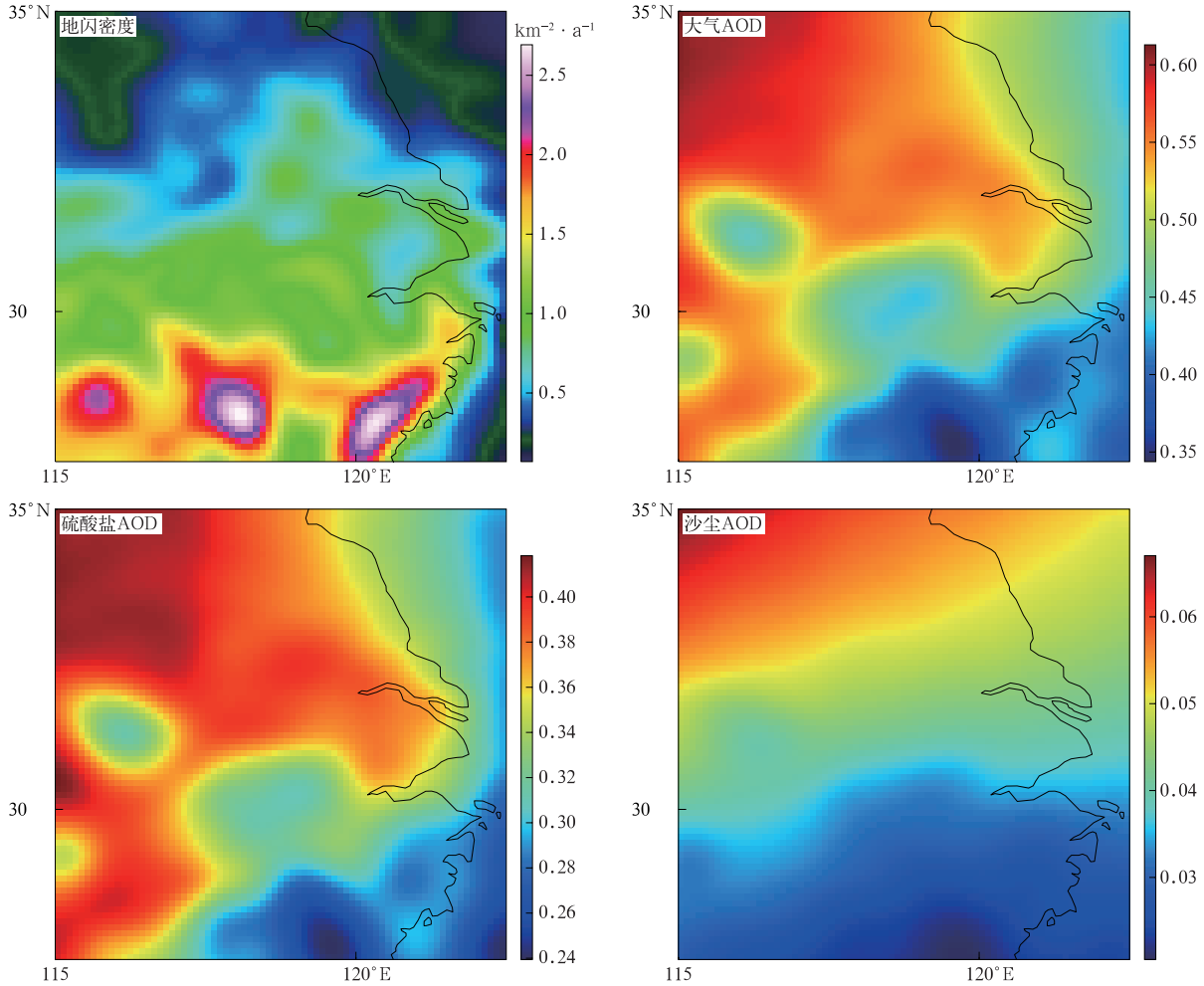


图 1 2015—2021 年长三角及周边地区地闪密度、大气 AOD、硫酸盐 AOD 和沙尘 AOD 空间分布
Fig. 1 Spatial distribution of cloud-to-ground lightning density, atmosphere AOD, sulfate AOD and dust AOD in the Yangtze River Delta from 2015 to 2021

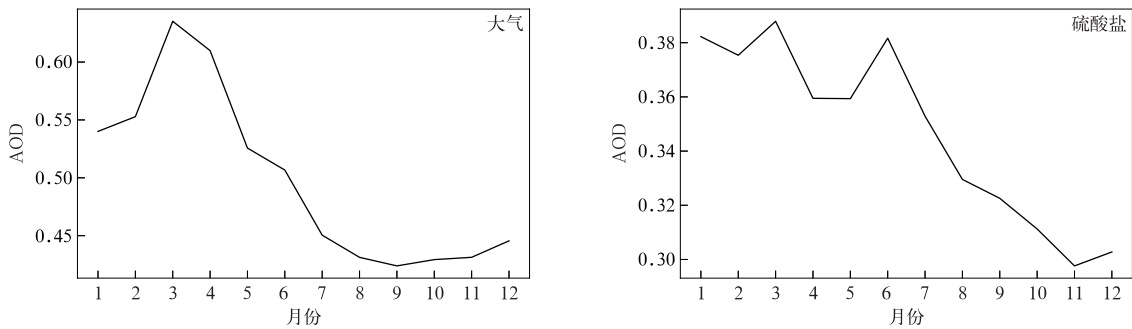
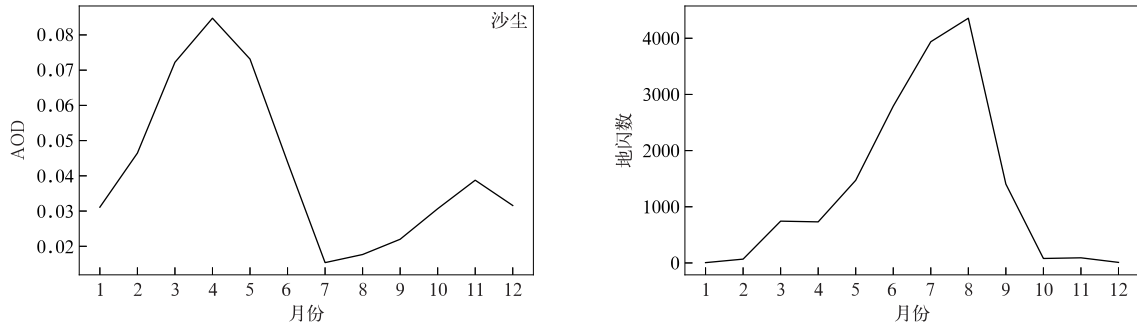


图 2 2015—2021 年长三角及周边地区逐月平均的大气 AOD、硫酸盐 AOD、沙尘 AOD 和地闪数
Fig. 2 Monthly averaged atmosphere AOD, sulfate AOD, dust AOD and cloud-to-ground lightning number in the Yangtze River Delta from 2015 to 2021



续图 2

平均的大气 AOD、硫酸盐 AOD、沙尘 AOD 和地闪数。由图 2 可见,大气 AOD 为 0.40~0.65,峰值出现在 3 月,随后快速下降,9 月降至最低;硫酸盐 AOD 为双峰特征,3 月和 6 月均为峰值;沙尘 AOD 先增加并在 4 月达到峰值,随后下降,7 月为最低值;地闪数在 8 月达到最大,由于 1—2 月和 10—12 月热力条件差,地闪活动不明显,在后续章节,仅针对地闪活动较为活跃的 4—9 月进行统计分析。

2.2 地闪活动和气溶胶关系

图 3 为 2015—2021 年长三角及其周边地区有地闪日的平均大气 AOD、硫酸盐 AOD 和沙尘 AOD 较无地闪日的相对变化。由于长三角及周边地区气溶胶以由硫酸盐气溶胶为主,有地闪日的大气 AOD 和硫酸盐 AOD 相对变化的空间分布类似,硫酸盐气溶胶作为云凝结核可参与云内过程,促进对流发生发展,这可能是有地闪日大气 AOD 和硫酸盐 AOD 较高的原因。有地闪日沙尘 AOD 较低。

逐月统计也得到类似结果,图 4 为 2015—2021 年 4—9 月长三角及其周边地区逐月平均的大气 AOD、硫酸盐 AOD 和沙尘 AOD 在有地闪日和无地闪日的对比,样本为各格点日平均值。由图 4 可见,4 月有地闪日的大气 AOD 比无地闪日偏高 50%,其余月份二者差异较小。硫酸盐 AOD 与大气 AOD 的结果相似,5 月和 9 月有地闪日硫酸盐 AOD 和无地闪日的差异达到 20%,6 月和 7 月二者差异不明显。Stolz 等^[29]研究发现当热力条件较好时,污染条件下与清洁条件下同高度云的雷达反射率因子之差较热力条件较差时偏小,推测热力条件较好时气溶胶的作用会减弱,因此夏季气溶胶对于地闪生成的影响不明显。所有月份有地闪日的沙尘 AOD 均较无地闪日偏低 20% 以上。由图 3 与图 4 可以看到,长三角及其周边区域 AOD 与地闪活动存在一定关系,地闪活跃时,大气 AOD 和硫酸盐 AOD 较高,沙尘 AOD 较低。

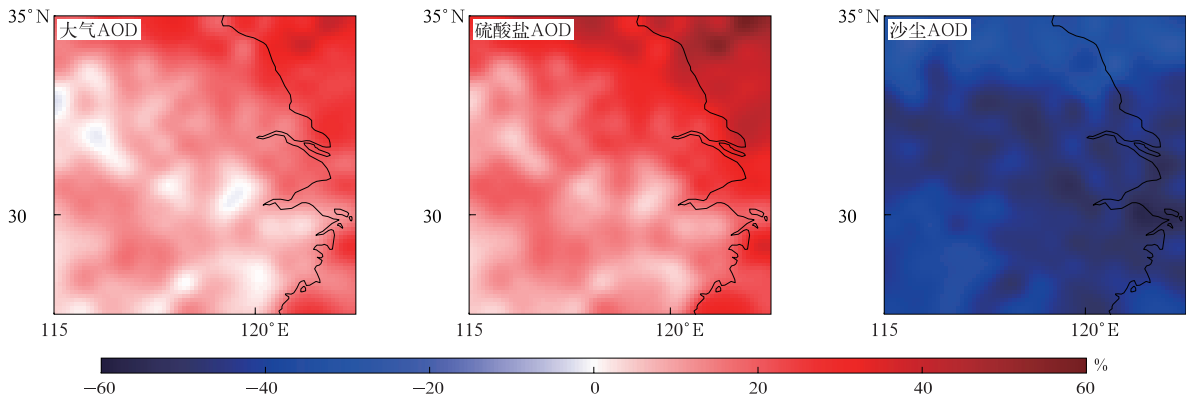


图 3 2015—2021 年长三角及其周边地区有地闪日平均大气 AOD、硫酸盐 AOD 和沙尘 AOD 较无地闪日的相对变化

Fig. 3 Spatial distribution of differences in monthly averaged atmosphere AOD, sulfate AOD and dust AOD between cloud-to-ground lightning days and no cloud-to-ground lightning days in the Yangtze River Delta from 2015 to 2021

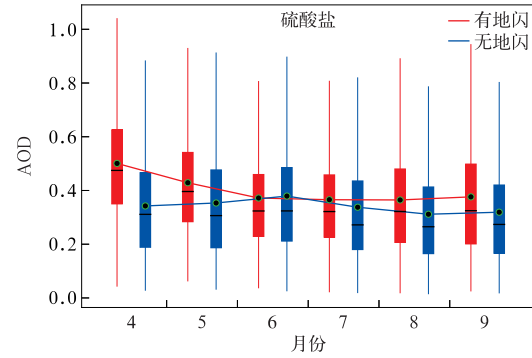
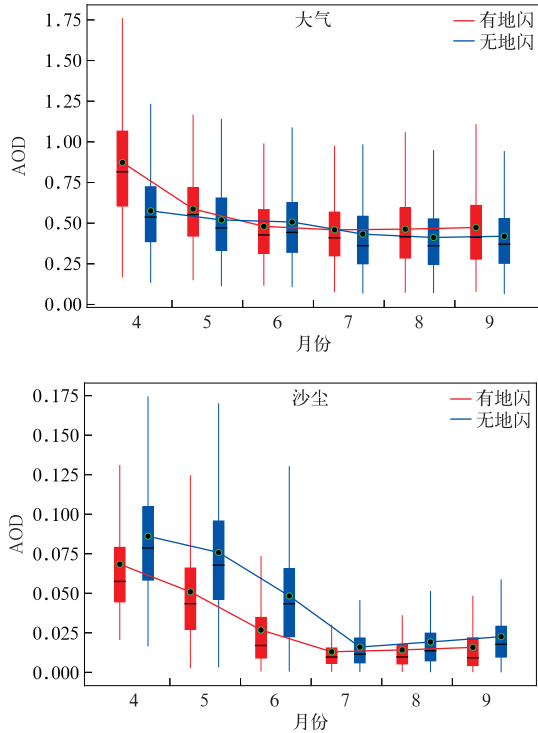


图 4 2015—2021 年 4—9 月长三角及其周边地区逐月平均的大气 AOD、硫酸盐 AOD 和沙尘 AOD 在有地闪日和无地闪日的箱线图

Fig. 4 Box plots of monthly averaged total AOD, sulfate AOD and dust AOD in cloud-to-ground lightning days and no cloud-to-ground lightning days in the Yangtze River Delta from Apr to Sep during 2015—2021

气溶胶不仅影响地闪生成,也影响地闪活跃程度。图 5 为 AOD 较高与较低条件下地闪密度的差值。在硫酸盐 AOD 较高时,大部分地区地闪密度较高,表明硫酸盐气溶胶对于地闪活动有促进作用。

由于研究区域内主要为硫酸盐气溶胶,大气 AOD 与硫酸盐气溶胶 AOD 有较为类似的结果。沙尘气溶胶与硫酸盐气溶胶的影响明显不同,沙尘 AOD 较高时,地闪密度偏低。

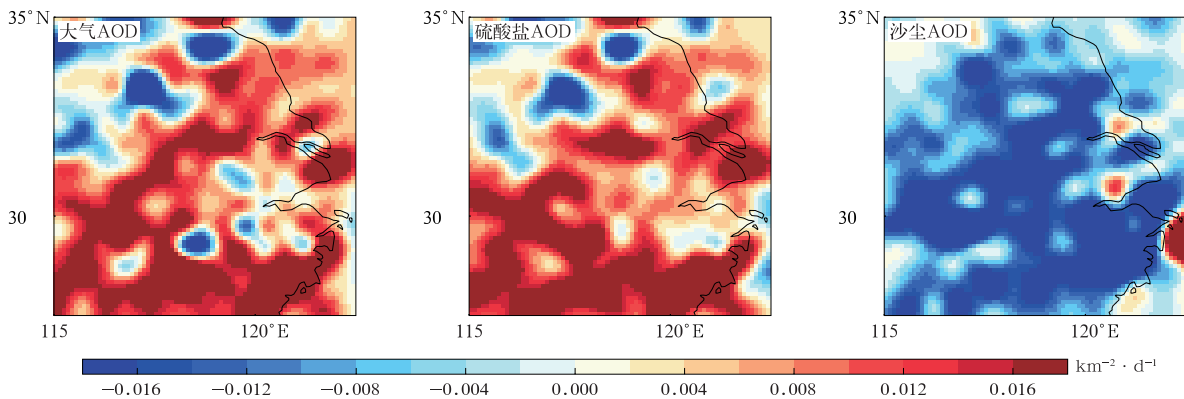


图 5 AOD 较高与较低条件下地闪密度差值

Fig. 5 Spatial distribution of differences in cloud-to-ground lightning density between high and low AOD conditions

2.3 地闪密度与 AOD 及相对湿度的关系

以上比较不同类型 AOD 和 AOD 高低条件下地闪活动的差异,以下定量分析地闪密度与 AOD 的相关性。图 6 为地闪密度与硫酸盐 AOD 的散点图。有研究指出气溶胶与闪电活动的关系在 AOD 达到阈值后发生转变。为了找出关系转变的阈值,

采用文献[30]的方法,对已有资料进行高斯函数拟合,将拟合所得峰值作为阈值;对低于阈值和高于阈值的情况分别计算皮尔森线性相关系数和拟合直线。由图 6 可见,各月份硫酸盐 AOD 低于阈值(图中细虚线,下同)时,其与地闪密度为较弱或中等的正相关关系,且均达到 0.05 显著性水平;当硫酸盐

AOD 高于阈值时,其与地闪密度的相关关系未达到 0.05 显著性水平。Wang 等^[22]指出,某些气象条件下气溶胶微物理效应与辐射效应共存,气溶胶与闪

电活动不一定表现为负相关关系,而是相关性不明显。不同月份的阈值也存在较大区别,表明硫酸盐气溶胶与地闪活动关系的复杂性。

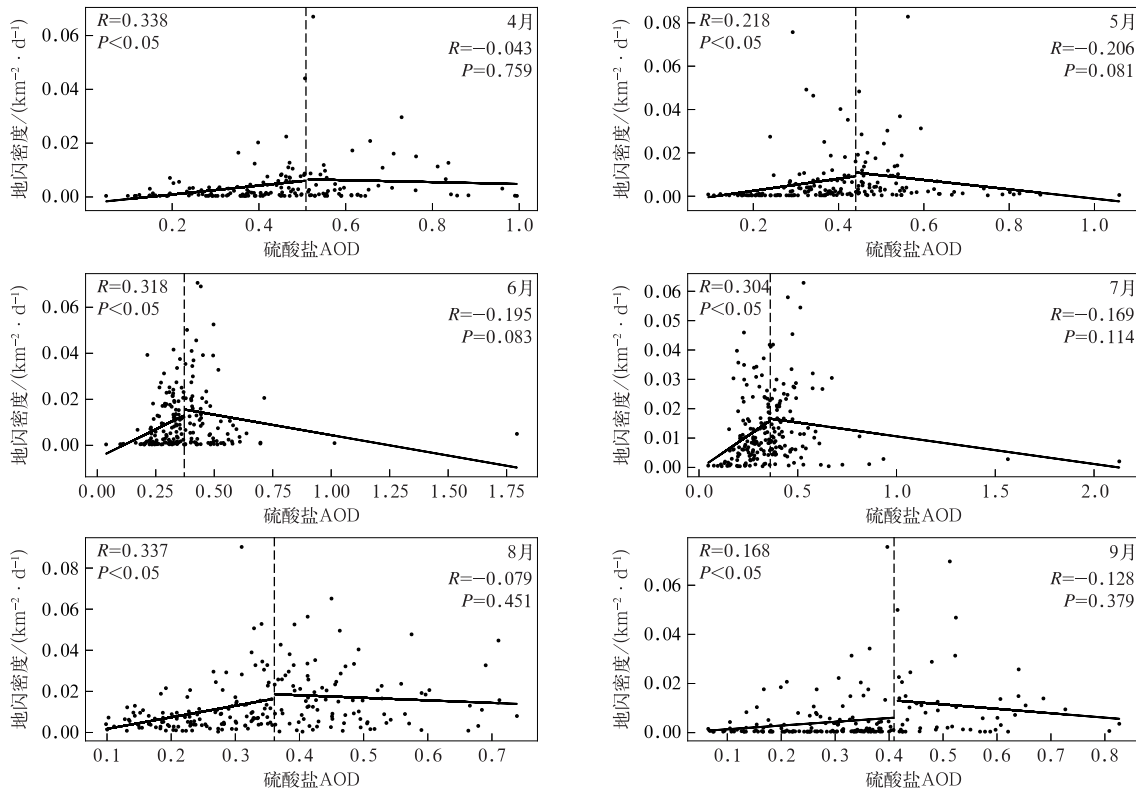


图 6 2015—2021 年 4—9 月长三角及其周边地区地闪密度与硫酸盐 AOD 散点图

Fig. 6 Scatter plots of cloud-to-ground lightning density and sulfate AOD in the Yangtze River Delta from Apr to Sep during 2015—2021

地闪活动不仅与气溶胶有关,也受热动力条件影响。研究认为低层相对湿度会影响地闪活动,低层相对湿度过低难以形成可产生地闪活动的对流云,低层相对湿度过高可能由于蒸发不利于上升运动^[31]。图 7 为地闪密度与 850 hPa 相对湿度的散点图。由图 7 可见,4 月、5 月和 6 月地闪密度与低层相对湿度为正相关关系,其余月份两者相关关系不显著或较弱。

相对湿度会影响硫酸盐 AOD 的值,图 8 为硫酸盐 AOD 与 850 hPa 相对湿度的散点图(R 为相关系数, P 为显著性水平,下同)。AOD 同时受相对湿度与气溶胶数浓度的影响,气溶胶粒子数浓度不变时,随着相对湿度的增加,硫酸盐气溶胶的吸湿增长特性使得气溶胶半径增大,导致 AOD 提升^[32]。云凝结核的数目也受相对湿度以及气溶胶粒子数浓度的影响,气溶胶粒子数浓度较大且水汽条件相对较

差会导致云凝结核数目小于气溶胶粒子数目^[33-34]。由图 8 可见,硫酸盐 AOD 较低时,4—6 月、7 月和 9 月两者为正相关关系,达到 0.05 显著性水平,此时相对湿度升高有利于硫酸盐气溶胶形成云凝结核,促进对流的生成与发展,进而有利于地闪活动加强;8 月相对湿度较高,但硫酸盐 AOD 与相对湿度的关系不明确,这是因为 AOD 增大也可能源于气溶胶数浓度的增加。

图 9 为地闪密度与沙尘气溶胶的关系。由图 9 可见,与硫酸盐气溶胶明显不同,沙尘气溶胶与地闪活动为负相关关系或者相关不明显。4—6 月沙尘 AOD 与地闪密度呈负相关关系,达到 0.05 显著性水平,7—9 月两者相关关系不显著。长三角地区沙尘 AOD 占大气 AOD 的比例较小,尤其是 7—9 月是沙尘气溶胶最低的月份(图 2),因此二者关系最弱。

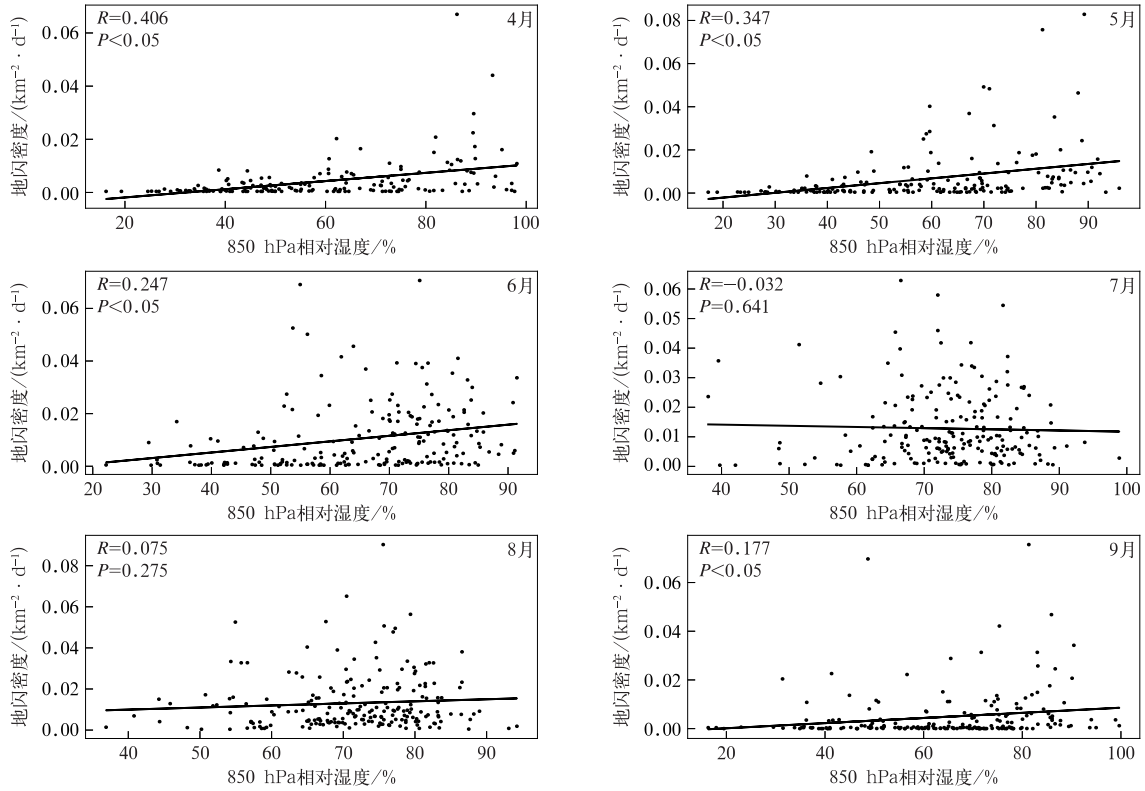


图7 2015—2021年4—9月长三角及其周边地区地闪密度与850 hPa相对湿度散点图
Fig. 7 Scatter plots of cloud-to-ground lightning density and 850 hPa relative humidity in the Yangtze River Delta from Apr to Sep during 2015—2021

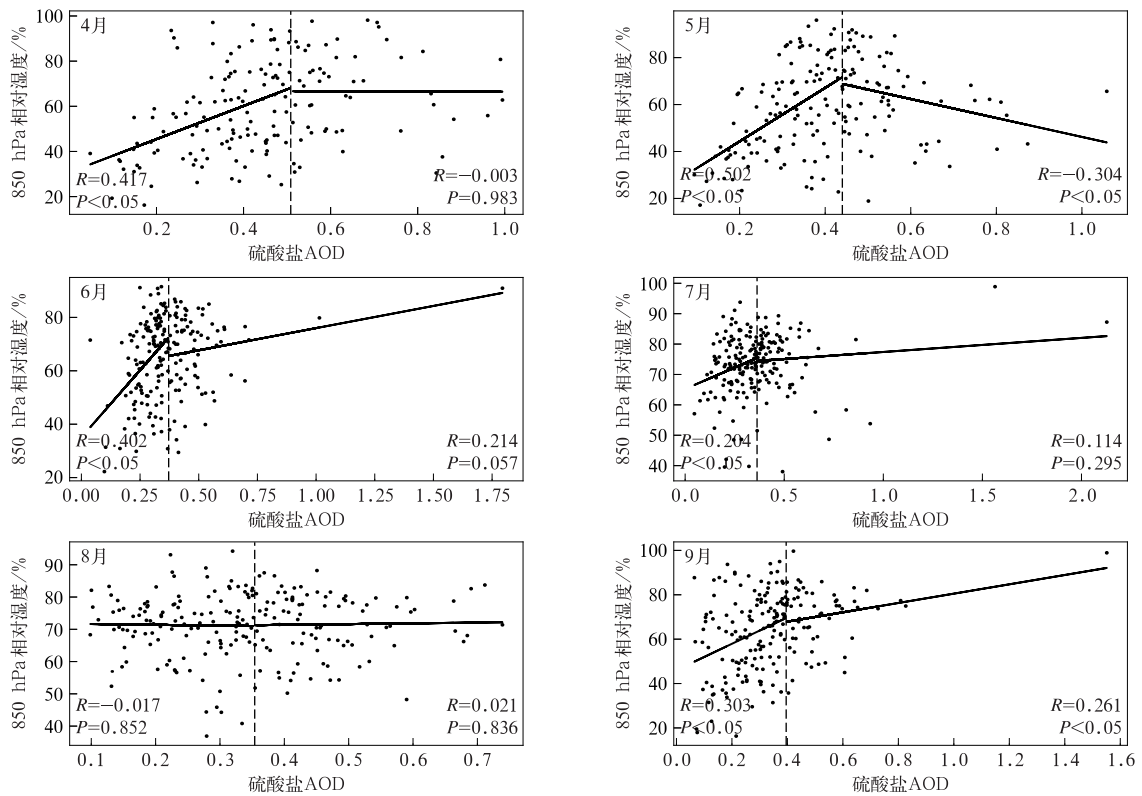


图8 2015—2021年4—9月长三角及其周边地区硫酸盐AOD与850 hPa相对湿度散点图
Fig. 8 Scatter plots of sulfate AOD and 850 hPa relative humidity in the Yangtze River Delta from Apr to Sep during 2015—2021

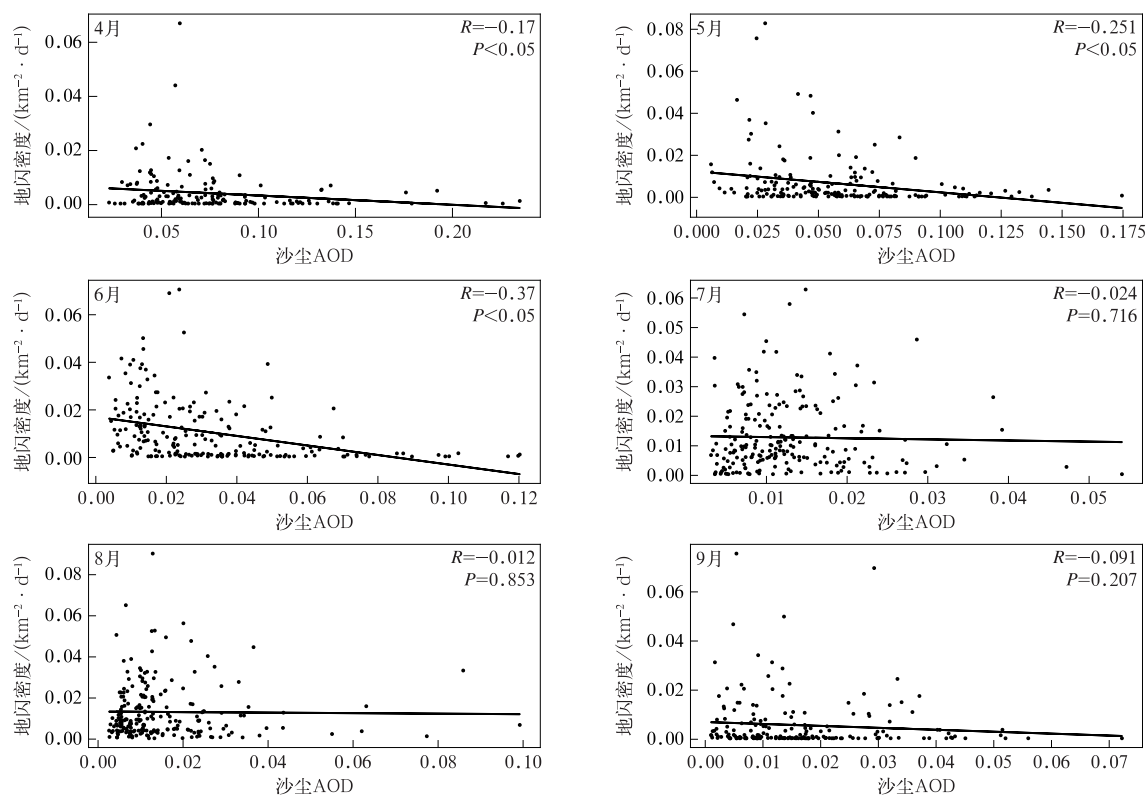


图9 2015—2021年4—9月长三角及其周边地区地闪密度与沙尘AOD散点图

Fig. 9 Scatter plots of cloud-to-ground lightning density and dust AOD in the Yangtze River Delta from Apr to Sep during 2015—2021

3 结论与讨论

本文通过统计分析2015—2021年地闪定位资料和AOD再分析资料,得到如下结论:

1) 长三角及其周边地区有地闪日的硫酸盐AOD较高,沙尘AOD较低。

2) 在地闪活动较为活跃的月份,随着硫酸盐AOD的升高,地闪密度增加,但硫酸盐AOD超过一定阈值后,地闪密度减小或保持不变,且不同月份的阈值存在差异。4—6月沙尘AOD与地闪活动呈负相关,7—9月关系不显著。

3) 低层相对湿度与地闪密度主要为正相关关系。硫酸盐AOD较低时,其与相对湿度为正相关,硫酸盐AOD较高时,二者关系不显著。

同一区域内地闪活动对不同种类气溶胶响应不同,这与不同种类气溶胶的辐射特性和吸湿特性以及气溶胶粒径大小等特征有关。研究显示:提升气溶胶浓度可以形成更多粒径更小的云滴,这类云滴更易到达对流云上层,影响地闪的生成^[35-37],硫酸盐

气溶胶浓度的升高可以通过以上过程促进地闪活动。随着气溶胶浓度不断加大,气溶胶的辐射作用不断加强,导致与高硫酸盐气溶胶浓度二者为较弱的负相关关系或相关不明显^[23,38],且相关关系转变的阈值在不同月份存在差异,这说明气溶胶与地闪活动关系的复杂性。沙尘气溶胶的影响较为复杂:从辐射作用看,沙尘气溶胶的吸收作用远高于硫酸盐气溶胶^[39];从微物理效应看,沙尘气溶胶可作为冰核影响冰相过程^[22,40],但被水溶性污染物包裹的沙尘粒子可作为云凝结核促进对流生成和发展^[41]。同时,强对流对沙尘气溶胶的清除作用可能导致两者呈负相关关系。研究指出,沙尘气溶胶的粒径远高于硫酸盐气溶胶^[42-43],这可能导致地闪活动减弱^[24]。

参考文献

- [1] 陈绍东,张义军,颜旭,等. 初始长连续电流引起的地电位抬升和SPD损坏. 应用气象学报, 2020, 31(2): 236-246.
Chen S D, Zhang Y J, Yan X, et al. Ground potential rise and surge protective device damage caused by initial long continuous current process in triggered lightning. *J Appl Meteor*

- Sci, 2020, 31(2): 236-246.
- [2] 马瑞阳, 郑栋, 姚雯, 等. 雷暴云特征数据集及我国雷暴活动特征. 应用气象学报, 2021, 32(3): 358-369.
Ma R Y, Zheng D, Yao W, et al. Thunderstorm feature dataset and characteristics of thunderstorm activities in China. *J Appl Meteor Sci*, 2021, 32(3): 358-369.
- [3] 任素玲, 牛宁, 覃丹宇, 等. 2021年2月北美极端低温暴雪的卫星遥感监测. 应用气象学报, 2022, 33(6): 696-710.
Ren S L, Niu N, Qin D Y, et al. Extreme cold and snowstorm event in North America in February 2021 based on satellite data. *J Appl Meteor Sci*, 2022, 33(6): 696-710.
- [4] Fan J, Wang Y, Rosenfeld D, et al. Review of aerosol-cloud interactions: Mechanisms, significance and challenges. *J Atmos Sci*, 2016, 73(11): 4221-4252.
- [5] Kaufman Y J, Tanré D, Holben B N, et al. Aerosol radiative impact on spectral solar flux at the surface, derived from principal-plane sky measurements. *J Atmos Sci*, 2002, 59(3): 635-646.
- [6] Tao W K, Chen J P, Li Z, et al. Impact of aerosols on convective clouds and precipitation. *Rev Geophys*, 2012, 50. DOI: 10.1029/2011RG000369.
- [7] Proestakis E, Kazadzis S, Lagouvardos K, et al. Lightning activity and aerosols in the Mediterranean region. *Atmos Res*, 2016, 170: 66-75.
- [8] Lal D M, Ghude S D, Mahakur M, et al. Relationship between aerosol and lightning over Indo-Gangetic Plain (IGP), India. *Climate Dyn*, 2018, 50(9): 3865-3884.
- [9] Altaratz O, Kucienska B, Kostinski A, et al. Global association of aerosol with flash density of intense lightning. *Environ Res Lett*, 2017, 12(11). DOI: 10.1088/1748-9326/aa922b.
- [10] Naccarato K P, Pinto Jr O, Pinto I R C A. Evidence of thermal and aerosol effects on the cloud-to-ground lightning density and polarity over large urban areas of Southeastern Brazil. *Geophys Res Lett*, 2003, 30(13). DOI: 10.1029/2003GL017496.
- [11] Steiger S M, Orville R E. Cloud-to-ground lightning enhancement over Southern Louisiana. *Geophys Res Lett*, 2003, 30(19). DOI: 10.1029/2003GL017923.
- [12] Kar S K, Liou Y A. Enhancement of cloud-to-ground lightning activity over Taipei, Taiwan in relation to urbanization. *Atmos Res*, 2014, 147/148: 111-120.
- [13] Westcott N E. Summertime cloud-to-ground lightning activity around major Midwestern urban areas. *J Appl Meteor*, 1995, 34(7): 1633-1642.
- [14] Wang H C, Shi Z, Wang X J, et al. Cloud-to-ground lightning response to aerosol over air-polluted urban areas in China. *Remote Sensing*, 2021, 13(3). DOI: 10.3390/rs13132600.
- [15] 梁苑新, 车慧正, 王宏, 等. 北京一次污染过程气溶胶光学特性及辐射效应. 应用气象学报, 2020, 31(5): 583-594.
Liang Y X, Che H Z, Wang H, et al. Aerosol optical properties and radiative effects during a pollution episode in Beijing. *J Appl Meteor Sci*, 2020, 31(5): 583-594.
- [16] 杨先逸, 车慧正, 陈权亮, 等. 天空辐射计观测反演北京城区气溶胶光学特性. 应用气象学报, 2020, 31(3): 373-384.
Yang X Y, Che H Z, Chen Q L, et al. Retrieval of aerosol optical properties by sky radiometer over urban Beijing. *J Appl Meteor Sci*, 2020, 31(3): 373-384.
- [17] Altaratz O, Koren I, Yair Y, et al. Lightning response to smoke from Amazonian fires. *Geophys Res Lett*, 2010, 37(7). DOI: 10.1029/2010GL042679.
- [18] Tan Y B, Peng L, Shi Z, et al. Lightning flash density in relation to aerosol over Nanjing (China). *Atmos Res*, 2016, 174/175: 1-8.
- [19] Du S, Tan Y B, Wang R, et al. Lightning and aerosol correlation in different regions of China. *Sci Technol Eng*, 2018, 18(6): 22-30.
- [20] Zhao P G, Li Z Q, Xiao H, et al. Distinct aerosol effects on cloud-to-ground lightning in the plateau and basin regions of Sichuan, Southwest China. *Atmos Chem Phys*, 2020, 20(21): 13379-13397.
- [21] Sun M Y, Qie X S, Liu D X, et al. Analysis of potential effects of aerosol on lightning activity in Beijing metropolitan region. *Chinese J Geophys*, 2020, 63(5): 1766-1744.
- [22] Sun C F, Liu D X, Xiao X, et al. The electrical activity of a thunderstorm under high dust circumstances over Beijing metropolitan region. *Atmos Res*, 2023, 285. DOI: 10.1016/j.atmosres.2023.106628.
- [23] Wang Q, Li Z, Guo J, et al. The climate impact of aerosols on the lightning flash rate: Is it detectable from long-term measurements?. *Atmos Chem Phys*, 2018, 18(17): 12797-12816.
- [24] Pan Z X, Mao F Y, Rosenfeld D, et al. Coarse sea spray inhibits lightning. *Nature Communications*, 2022, 13. DOI: 10.1038/s41467-022-31714-5.
- [25] Yang X, Li Z Q. Increases in thunderstorm activity and relationships with air pollution in southeast China. *J Geophys Res Atmos*, 2014, 119(4): 1835-1844.
- [26] Xia R, Zhang D, Wang B. A 6-yr cloud-to-ground lightning climatology and its relationship to rainfall over central and eastern China. *J Appl Meteor Climatol*, 2015(12): 2443-2460.
- [27] Randles C A, da Silva A M, Buchard V, et al. The MERRA-2 aerosol reanalysis, 1980 onward. Part I: System description and data assimilation evaluation. *J Climate*, 2017, 30(17): 6823-6850.
- [28] Hersbach H, Bell B, Berrisford P, et al. The ERA5 global reanalysis. *Quart J Royal Meteor Soc*, 2020, 146(730): 1999-2049.
- [29] Stolz D C, Rutledge S A, Pierce J R. Simultaneous influences of thermodynamics and aerosols on deep convection and lightning in the tropics. *J Geophys Res Atmos*, 2015, 120(12): 6207-6231.
- [30] Pérez-Invernón F J, Huntrieser H, Gordillo-Vázquez F J, et al. Influence of the COVID-19 lockdown on lightning activity in the Po Valley. *Atmos Res*, 2021, 263. DOI: 10.1016/j.atmosres.

2021. 105808.
- [31] 张腾飞,许迎杰,张杰,等. 云南省闪电活动时大气相对湿度结构特征. *应用气象学报*, 2010, 21(2): 180-188.
Zhang T F, Xu Y J, Zhang J, et al. Structural characteristics of atmospheric relative humidity during lightning activity in Yunnan Province. *J Appl Meteor Sci*, 2010, 21(2): 180-188.
- [32] 俞海洋,张杰,李婷,等. 2000—2013年北京及周边地区大气气溶胶光学厚度时空变化特征及气象影响因素分析. *气象科学*, 2018, 38(4): 512-522.
Yu H Y, Zhang J, Li T, et al. Spatia-temporal variation of atmospheric aerosol optical depth and the meteorological factors in Beijing and surrounding area from 2000 to 2013. *J Meteor Sci*, 2018, 38(4): 512-522.
- [33] 高茜,刘全,毕凯,等. 基于航测的云底气溶胶活化率与过饱和度估算. *应用气象学报*, 2021, 32(6): 653-664.
Gao Q, Liu Q, Bi K, et al. Estimation of aerosol activation ratio and water vapor supersaturation at cloud base using aircraft measurement. *J Appl Meteor Sci*, 2021, 32(6): 653-664.
- [34] 马学谦,郭学良,刘娜,等. 青藏高原中东部气溶胶特征的飞机观测. *应用气象学报*, 2021, 32(6): 706-719.
Ma X Q, Guo X L, Liu N, et al. Aircraft measurements on properties of aerosols over the central and eastern Qinghai-Tibet Plateau. *J Appl Meteor Sci*, 2021, 32(6): 706-719.
- [35] Rosenfeld D, Andreae M O, Asmi A, et al. Global observations of aerosol-cloud-precipitation-climate interactions. *Rev Geophys*, 2014, 52: 750-808.
- [36] Yuan T, Remer L A, Pickering K E, et al. Observational evidence of aerosol enhancement of lightning activity and convective invigoration. *Geophys Res Lett*, 2011, 34(4). DOI: 10.1029/2011GL046052.
- [37] 李义宇,孙鸿娉,杨俊梅,等. 华北中部夏季气溶胶和云分布特征. *应用气象学报*, 2021, 32(6): 665-676.
Li Y Y, Sun H P, Yang J M, et al. Characteristics of aerosol and cloud over the central plain of North China in summer. *J Appl Meteor Sci*, 2021, 32(6): 665-676.
- [38] Hu J, Rosenfeld D, Ryzhkov A, et al. Polarimetric radar convective cell tracking reveals large sensitivity of cloud precipitation and electrification properties to CCN. *J Geophys Res Atmos*, 2019, 124(22): 12194-12205.
- [39] Sokolik I, Toon O. Direct radiative forcing by anthropogenic airborne mineral aerosols. *Nature*, 1996, 381: 681-683.
- [40] Andreae M O, Rosenfeld D. Aerosol-cloud-precipitation interactions. Part 1. The nature and sources of cloud-active aerosols. *Earth Science Reviews*, 2008, 89(1/2): 13-41.
- [41] Zhu H, Li R, Yang S, et al. The impacts of dust aerosol and convective available potential energy on precipitation vertical structure in southeastern China as seen from multisource observations. *Atmos Chem Phys*, 2023, 23: 2421-2437.
- [42] 毛华云,田刚,黄玉虎,等. 北京市大气环境中硫酸盐、硝酸盐粒径分布及存在形式. *环境科学*, 2011, 32(5): 1237-1241.
Mao H Y, Tian G, Huang Y H, et al. Mass size distributions and existing forms of sulfate and nitrate at atmospheric environment in Beijing. *Environmental Science*, 2011, 32(5): 1237-1241.
- [43] Xiong J, Zhao T L, Bai Y Q, et al. Simulation and analyses of the potential impacts of different particle-size dust aerosols caused by the Qinghai-Tibet Plateau desertification on East Asia. *Sustainability*, 2020, 12(8). DOI: 10.3390/su12083231.

Effects of Different Aerosols on Cloud-to-ground Lightning Activity in the Yangtze River Delta

Wu Xiaotian¹⁾ Wang Xiaoyan¹⁾ Zheng Dong²⁾ Zhang Yijun¹⁾

¹⁾(Department of Atmospheric and Oceanic Sciences, Fudan University, Shanghai 200438)

²⁾(State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081)

Abstract

Lightning activity poses threats to human life and property safety. A large volume studies indicate that aerosol plays a significant role in lightning activity. To explore the effect of different types of aerosols on lightning activity in the Yangtze River Delta and its surrounding areas, cloud-to-ground (CG) lightning location data and aerosol optical depth from reanalysis dataset is analyzed in the target area(27.5°–35°N, 115°–122.5°E) during 2015–2021.

The spatial distribution of aerosol optical depth (AOD) with CG lightning condition and without CG lightning condition, and monthly variation of aerosol concentration under two conditions are investigated. All the grids in the target region show that sulfate AOD is higher, while dust AOD is lower with CG lightning. In summer there are little differences between the AOD with CG lightning and without CG lightning conditions. In other months, more sulfate aerosol and less dust aerosol are found with CG lightning condition.

The spatial distribution of CG lightning density difference under higher and lower AOD conditions is given. The results show that when the sulfate AOD is high, the CG lightning density of most grids is higher. The CG lightning density is significantly lower when the dust AOD is high.

The correlation coefficient between CG lightning density and the AOD for different types of aerosols is calculated for the months when CG lightning is active. When the concentration of sulfate aerosol is low, the correlation coefficient between sulfate AOD and CG lightning density is significant. When the sulfate aerosol concentration exceeds a certain threshold, there is no significant correlation between CG lightning density and sulfate AOD. The positive correlation may be due to the fact that the cloud microphysical effect of sulfate aerosols can promote the development of convection. With sufficient water vapors, sulfate aerosols form cloud condensation nuclei and promote CG lightning activity. When the concentration of sulfate aerosols is higher than the threshold value, the cloud microphysical effect and the radiation effect of aerosol may be counterbalanced, which may lead to weak correlation between CG lightning density and aerosol concentration. The results also show a weak negative correlation between dust aerosol and CG lightning density in April, May, June, and no significant correlation in July, August, September. Considering the low concentration of dust aerosols in the Yangtze River Delta and its surrounding areas, the inhibitory effect of dust aerosols on CG lightning activity may not be just explained by the radiation effect. The large particle size of dust aerosol may play a significant role in suppressing CG lightning activity.

Key words: cloud-to-ground lightning activity; aerosol; cloud microphysics