

四川盆地闪电活动特征及其影响因素的分析

戚云彤, 黄兴友*

南京信息工程大学大气物理学院, 江苏 南京

收稿日期: 2023年10月2日; 录用日期: 2023年11月1日; 发布日期: 2023年11月9日

摘要

本文选取2010~2018年6~8月的闪电活动数据, 从地理分布、时间分布和其他分布三个方面分析了四川盆地地区闪电活动的不同特征, 结合观测数据绘制图片并分析其分布原因。四川地区闪电主要分布在西部和南部, 或集中在东南部对流活动强烈的盆地地区, 中部地区由于深处内陆水汽较少, 受大气环流影响较小, 因此闪电系统形成受到阻碍, 闪电频次较低, 在6~8月中闪电频率大多在10次以下。由于当地的地形地势、水汽和地理环境等多种因素的影响, 气溶胶的年度分布也和季节变化密切相关; 当存在一定的热力不稳定条件时, 垂直风切变的增强将会进一步加剧和发展风暴; 在四川盆地地区, CAPE与闪电密度之间存在着显著的正相关关系; 闪电活动在温度、湿度条件不同的时候会显现出不同的特征, 闪电多发生在降水充足的夏季, 一天之中主要集中在日出前后以及12~20时, 湿度增加的速率高于温度, 在雷电的影响下, 降水增多, 对流活动强, 在午后时段温度、湿度均达到峰值, 随后温度下降, 湿度在晚间缓慢回升。

关键词

雷电活动分析, CAPE值, 四川盆地, 垂直风切变

The Influence of Special Topography on Lightning Activity in Sichuan Basin

Yuntong Qi, Xingyou Huang*

Department of Atmospheric Physics, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing Jiangsu

Received: Oct. 2nd, 2023; accepted: Nov. 1st, 2023; published: Nov. 9th, 2023

Abstract

In this paper, lightning activity data from June to August of 2010 to 2018 are selected to analyze

*通讯作者。

the different characteristics of lightning activity in the Sichuan Basin from three aspects: geographical distribution, temporal distribution and other distribution. In Sichuan area, lightning is mainly distributed in the west and south, or concentrated in the southeastern basin area with strong convective activities. In the central area, the formation of lightning system is hindered due to the lack of deep inland water vapor, which is less affected by atmospheric circulation, and the lightning frequency is relatively low. From June to August, the number of lightning frequency is mostly less than 10. Due to the local topography, water vapor and geographical environment, the annual distribution of aerosol is also closely related to seasonal changes. When there is a certain thermal instability condition, the vertical wind shear will further intensify and develop storms. There is a significant positive correlation between CAPE and lightning density in Sichuan Basin. Lightning activity will show different characteristics when the temperature and humidity conditions are different. Lightning occurs in summer when there is sufficient precipitation, mainly around sunrise and from 12 to 20 in a day, and the humidity increases faster than the temperature. Under the influence of lightning, precipitation increases and convective activity is strong. Both temperature and humidity peak in the afternoon, then the temperature decreases, and humidity rises slowly in the evening.

Keywords

Lightning Activity Analysis, CAPE Value, Sichuan Basin, Vertical Wind Shear

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

闪电在四川盆地的活动具有突发性和较强的强度, 其时空分布呈现出不均匀的特征。本文旨在对四川省的闪电活动与地形变化、降水变化等进行深入分析研究, 通过对已有数据的雷暴概述和统计结果分析, 结合春夏秋冬四个季节的平均雷暴日和年际变化, 对比分析年平均雷暴日的变化趋势以及地形、降水等因素对其的影响, 总结出四川地区所属地形与闪电活动之间的紧密关系。

随着一些观测手段的提高, 人们通过卫星遥感、地基遥感等技术, 获得了大量闪电观测资料, 利用这些资料可以对四川盆地的闪电活动做出分析。目前已有的研究表明, 朱蓓孝等[1]通过 1998~2008 年 11 年间卫星上的闪电分析仪及其观测资料得出结论: 闪电分布与海拔、复合地形指数有着线性关系。周筠珺等[2]认为中国西南及周边地区的气候、地貌和下垫层性质差别很大, 导致了这一区域雷电的空间分配很不平衡; 周等[3]通过我国中部地貌过渡带的雷电特征, 得出相似结论。郗秀书等[4]研究发现不同地区的闪电在闪电频数或强度方面都有很大的差别, 海陆环境是影响因素之一。郗秀书等[5]比较青藏高原地区闪击数据, 分析发现上述地区的雷电活动日变化高峰通常出现在 14:00~16:00 LT 期间, 在中国中西部一带的较显著高山地区早于这一时间, 而位于较显著的低海拔的塔里木和柴达木盆地则晚于这一时间。戴建华等[6]研究发现长三角地区的闪电活动区主要分布在上海的东部, 水域闪电少于陆地。陈春梅等[7]运用了四川省宜宾泸州长江河谷地区的 2011~2015 年地闪数据, 对该境内的雷电强度分布、频次分布、持续时间分布等特点, 进行了数据分析。王赧[8]等人, 利用数理统计、GIS 等空间数据分析的方法, 研究了雷电特征及其与地理环境之间的相互关系。李家启等[9]通过考察了重庆地区雷电过程, 发现地形、太阳辐射等是影响日分布现象形成的最主要原因。然而, 现阶段基于四川盆地特殊地形的雷电闪击特征的研究资料仍然很少, 因此本文依据已有的四川地区雷电活动观测资料进行分析, 旨在找出四川盆地在

雷电活动, 闪击频率与闪电分布等方面的特征, 为气象防雷减灾等领域提供参考。

此外, 还有一些学者针对不同地区的闪电活动的影响因素作出了研究: 冯鹤等[10]研究太行山附近闪电资料, 发现太行山闪电发生频数为中部、北部多于南部, 东部多于西部, 平均闪电强度较高区域在山脉南侧较为集中。范仲之等[11]研究地形因素对闪电时空分布的影响, 发现闪电活动与海拔高度的相关性实质是海拔梯度对雷暴发展提供抬升动力的体现。童杭伟等[12]通过分析根据雷电定位系统积累数据绘制的2004~2007年浙江平均地闪密度图, 总结了浙江省雷电活动的特点, 发现雷电活动与地形、季节性气候等较为相关。赵生昊等[13]研究重庆地区闪电活动, 发现海拔高度、坡向对地闪密度具有影响, 坡度与地闪密度呈负相关关系; 不同坡向分类之间的地闪强度分布具有明显差异, 海拔高度、坡度与地闪强度不相关。王学良等[14]发现山区地闪密度略高于平原地区, 平原正地闪百分比稍高于山区, 近10年的正地闪百分比呈上升趋势。余建华等[15]研究江西地区强雷暴的特征, 发现江西强雷电活动活跃区主要分布于城乡建设用地, 雷电活动的落雷概率最高, 其次为耕地。Zipser等[16]根据时域有限差分法研究了雷电感应电压, 从而对比数据资料得出平坦与非平坦地区的雷电差异。黄凯莉等[17]发现当地表出现特殊的地形结构时, 真实的地形会增强垂直电场的峰值。张其林等[18]研究发现粗糙地表对地闪首次回击垂直电场的影响较小, 但对继后回击存在明显的影响。张源源等[19]分析研究了真实地形地表对深圳地区闪电定位精度的影响。

此外, 本文将选取四川盆地中的几处地区的闪电活动资料进行分析, 利用2010~2018年6~8月的数据针对其年、日雷暴数据进行对比分析。同时我们将分析川盆地地理特征、热力学、动力学、气溶胶等参数对闪电活动的影响, 根据已有的研究数据, 得出四川盆地地区闪电活动的特征。

2. 基本概况

我国的雷电活动呈现出明显的地域差异, 东南沿海的低海拔地带雷电密度较高, 而中国西南部的中海拔地带则相对较低, 随着地区的上升, 雷电密度呈下降趋势, 而随着海陆距离的缩短, 则呈上升趋势。划分世界平均雷暴日的过程, 紧密关联于海洋环流、海陆位置、地形地貌、冷热洋流以及局部天气环境等多种因素。

中国的西南地区是我国地形最为错综复杂的区域之一, 其地貌类型繁多, 包括高原、山地、丘陵、盆地、平原等多种类型。由于受季风气候影响, 该区域内存在着许多独特而又重要的地质构造现象, 如地震活动等。地处中国东部季风带与青藏高原高寒带之间的交接区域, 为四川地区的重要地理位置所在。该地区具有独特而又重要的地理位置, 其特殊的地理环境使之成为我国生物多样性最为丰富的地区。该地区地形复杂, 纬度较低, 海拔较高, 山峦起伏, 谷地深邃, 多种地貌相互交错, 气候差异显著。由于受地理条件及历史原因等因素影响, 该地区在地质构造上也具有明显的分区性特征。四川盆地位于中国西南地区, 其面积约为26万余平方千米, 是该地区地势最为低洼的区域之一。四川盆地被周围一系列连结的山脉(海拔1~3千米)环绕而成, 它在地理上几乎是完全封闭的。四川盆地为丘陵性盆地, 除了西北部是成都平原外, 盆地中以丘陵为主; 盆地东部有一系列的平行岭谷。四川省具有非常频繁的雷暴活动, 是灾害多发区之一。

从雷电发生的月份来看, 四川省雷电活动基本覆盖1~12月。其中, 1~4月和11~12月发生雷电次数较少, 雷电活动主要发生在5~10月, 7~9月是雷电高发时段。从每天的时段来看, 四川省雷电活动主要集中在0:00至6:00、15:00至24:00, 其中3:00雷电活动最为频繁。从雷电发生的位置分析, 四川省雷电分布和地势有很大的关系。盆地地区雷电密度值较高, 高原地区雷电密度值较低, 盆地到高原的过渡区域、盆地内的丘陵地区是雷电密度最高的区域。雷电日数较多的区域主要在阿坝藏族羌族自治州、甘孜藏族自治州、广元市、达州市、广安市、资阳市、宜宾市、泸州市。

本文主要选取四川地区不同因素受闪电活动的影响, 主要从地形因素、时间因素以及其他相关因素三个方面进行具体分析。

3. 四川盆地闪电活动地理分布

近年来, 闪电天灾一直是世界上最严重的灾害之一。四川西南地区是中国雷电灾害的高发区, 雷电活动极为密集, 雷电活动造成灾害的主要月份为 3~10 月, 由于雷击活动而产生的人员伤亡和财产损失都十分严重, 对四川盆地的雷电活动的历史特征具有重大研究价值, 所以本研究将选择对 2010~2018 年 6~8 月的雷电情况进行深入研究。

闪电活动的空间分布特征

超级闪电的分布呈现出均匀的趋势, 其发生受到地理位置、年份、季节等多种因素的紧密交织影响。其中尤以气候条件为主要影响因子。在地中海风格区域, 特别是在大西洋地区的安第斯山脉和日本东部, 广泛分布, 而在非洲热带海洋最南端的热点区域, 则相对罕见。

华南的云贵川渝一带均处于雷电密度高值区, 其密值经常超过 15 fl/km²/a 的水准; 而中国其他多数地区的雷电活动强度都很高, 并存在着一定规律。在广东和海南、华北、江淮、江南、中国东北地区、内蒙和西北的东部, 雷电密度均为中次高值地区(6~15 fl/km²/a), 而在西北地区的西部, 则为雷电密度最低的地区(小于 1 fl/km²/a), 而在西藏地区, 则为雷电密度中次最低数额地区(1~6 fl/km²/a)。从空间上看, 闪电总能量随纬度增高而升高, 且呈正相关关系。据闪电资料计算, 各区域的闪电总能量以及相应时段内的闪电发生次数与该区域的雷暴日之间呈现出显著的相关性。因此, 我们可以利用闪电信息来分析雷电天气过程, 特别是针对不同季节、不同地域、不同高度上出现频率较大的强对流风暴进行预报。中国高原地带的雷阵雨运动主要表现为局地对流活动, 但时间相对较短, 因此卫星观测到的概率也相对较低, 这可能与该地区雷阵雨运动活跃分布规律以及卫星所观察到的平均闪电密度分布情况高度一致, 但除藏族区外, 总闪密度并不高。此外, 平时雷阵雨日也相对较多。

图 1 为四川盆地及其周边地区, 根据 TRMM 卫星和 LS 扫描参数, 利用 Matlab 软件对 2010~2018 年 6~8 月的闪电数据进行绘图处理, 我们可以得到如下分布图。

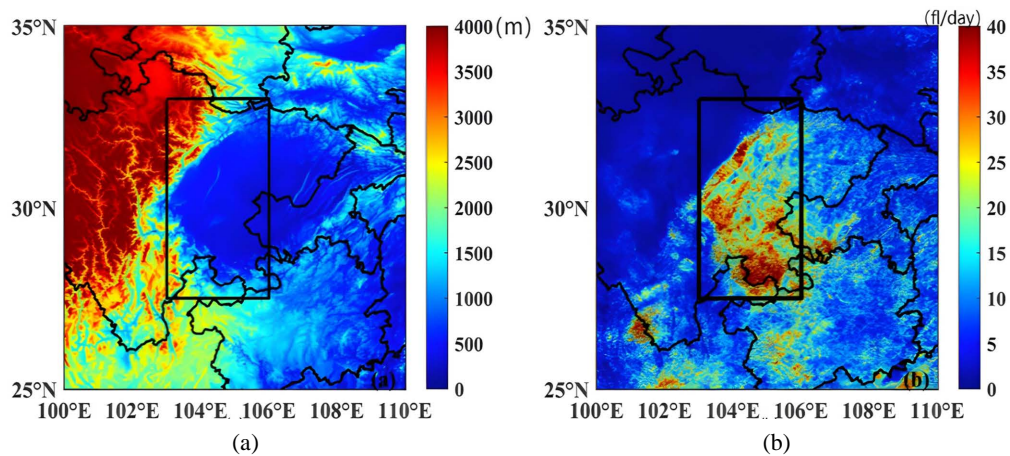


Figure 1. Contour map and spatial distribution of lightning in selected areas of Sichuan Basin. (a) Contour map of surrounding areas of Sichuan Basin. The study areas are marked with black squares on the map; (b) Spatial distribution of CG lightning in Sichuan Basin from June to August 2010 to 2018

图 1. 四川盆地所选区域等高线及闪电空间分布图。(a) 四川盆地周边地区等高线图。研究区域在图上用黑色方块标出; (b) 2010~2018 年 6~8 月四川盆地 CG 闪电空间分布

从图中可以看出, 四川盆地位于中国西南低海拔地区。它拥有世界上最复杂的地形之一。平均海拔 500 米左右的 SB 与平均海拔 4000 米以上的青藏高原(TP)和横断山脉(HM)形成明显的下降。图 1(a)中的黑色方

框是本研究中的研究区域(27.5°~33°N, 103°~106°E)。该地区位于四川盆地西部, 靠近青藏高原和横断山脉。在相对较短的西向东水平距离内, 高度下降了近 3000 m。特殊的地理环境导致夏季对流活动频繁。

从图 1(b)可以看出, 所选研究区域为四川盆地雷电分布的主要区域, 主要的雷电活动都集中在该区域。雷电密度大的区域主要分布在西部和南部, 东北部较为稀疏, 西南部多数地区 8 年内总闪电数量在 25 次以上, 有部分地区总量能达到 35 次以上, 东北部总数量在 20 次左右, 极少数地区能达到 30 次。在 28°N~30°N, 104°E~106°E 的区域内闪电的密度最大, 能在 6~8 月总闪电频次的统计中达到 30 次左右。该处地区深受平均海拔高地貌上较为复杂的规模庞大的青藏高原地区, 以及南北走向的横断山脉地形地势的限制, 暖湿气流由于面临平均海拔较高的山地, 很容易就被挡住了喜马拉雅地区的横断山脉, 由于没有耗冷量, 强对流运动无法活动; 而在这些高山上往往发生了剧烈的活动, 使得大气的热不平衡运动能进一步积累并产生出大量高能物质, 因此也推动了中低层对流运动的进行和加强。在研究地区北方, 因为高山地背风面所产生的冷空气沿着河谷方向向下流到低平地(即山风), 而下沉空气又控制着大气对流的活动, 因此抑制了雷阵雨的生成, 也使得该地区北方的雷阵雨密度相对于南方来说更小。位于喜马拉雅南麓东南面的中国西南地区西部, 横断山脉东部所形成的一个突出的低密度闪电地。另外该地区还存在着一些小范围的低地雷暴活动带, 这主要是由这些地区特殊的地理气候环境所决定的。另外, 由于该区域地势较高, 地势的升降影响比较明显, 而且地势起伏也很大, 因此地表的凹凸不平处又可以造成垂直走向的干扰, 这样就为积云的发展提供了必要条件。这样, 由于雷暴较容易产生, 其雷电的密度也较高。

选取 2010~2018 年 6~8 月四川盆地云对地闪电空间分布, 绘制图片, 对闪电数据进行 92 天移动平均处理, 计算出 92 天(6、7、8 月)的平均值, 代表每年夏季闪电频次的数值。

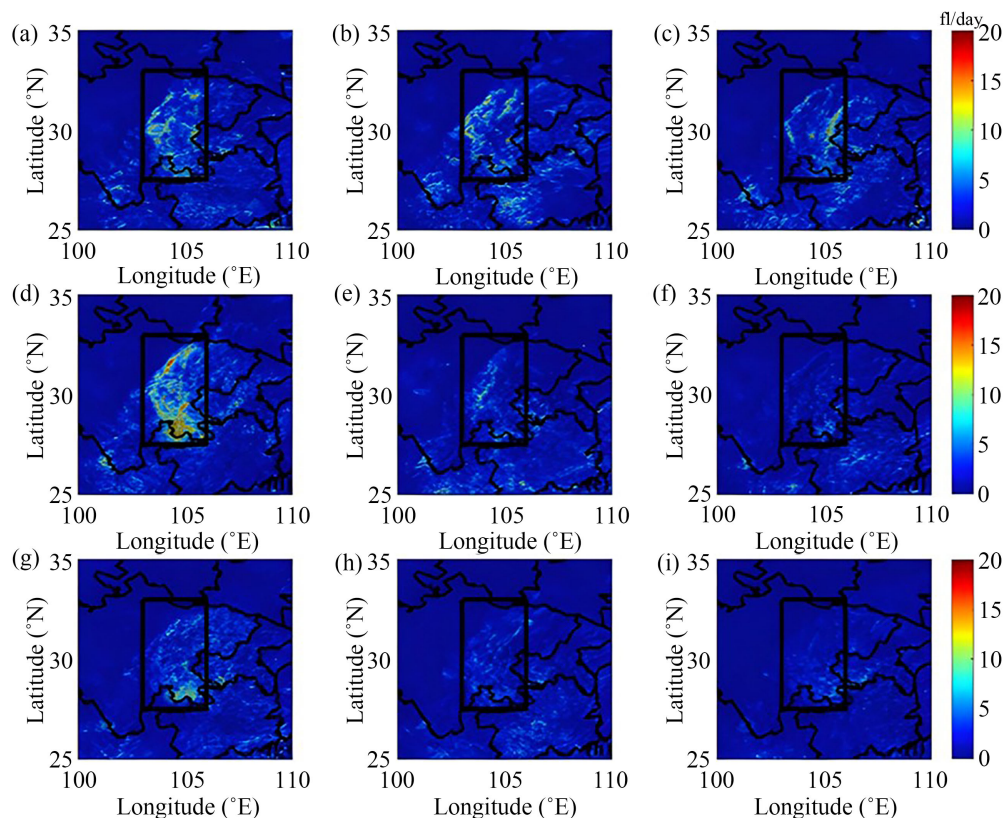


Figure 2. 2010~2018 年 6~8 月四川盆地云对地闪电空间分布(a~i) 2010~2018

图 2. Spatial distribution of cloud-to-ground lightning in Sichuan Basin from June to August 2010 (a~i)

如图显示, 四川盆地地区在 6~8 月为雷电的主要爆发阶段, 六月的雷电密度到达了一次的高峰, 但此后雷电稍有减弱, 7 月以后又迅速增加, 到八月到达高峰; 而六月的雷电主要分布在西南地区, 由于受到地质因素, 火山雨、季风环流因素的干扰, 到七月、八月主要分布在南方, 少量雷电则散布在东南部。在 2010~2018 年, 该研究地区的闪电数量上升明显, 在海拔较高的地方, 闪电的密度相对较低, 而在海拔较低的地方则呈现出较高的密度; 在地形变化的情况下, 当坡度较大时, 地形相对平缓时, 地形变得更加陡峭; 随着高度增加, 其变化幅度变小。

在 2010~2018 年间, 地闪频率在 2010~2012 年间逐年减少, 2010 年主要分布在横断山脉下, 在西南地区频率较高, 在 6~8 月中闪电频率大多在 10 次以下, 极少部分地区在 10 次以上, 但均没有超过 20 次。2011~2012 年闪电高频区逐步向东南方向移动, 中部地区由于地势较低, 深处内陆, 所以闪电频率相对较少, 呈现“四周多, 中间少”的趋势, 东部出现 3 月内闪电出现次数在 15 次以上的地区。2013 年闪电频率达到顶峰, 在南部地区闪电频次多在 15~20 次, 闪电分布西部高于东部, 西部地区闪电频率在 10 次左右, 在山脉附近闪电频率高达 15 次以上, 中部地区闪电频率明显增高, 多在 10 次以下, 但是相较于前两年明显增多, 东部地区闪电分布稀疏。在 2014~2015 年期间, 闪电频率明显下降, 主要分布在西北、东南两个区域, 闪电频次均在 10 次以下, 没有特高频次的闪电; 2016 年闪电频次少量增加, 主要分布在南部地区, 该地区平均闪电频次在 10 次左右, 北部地区分布稀疏, 但是相比较 2014~2015 有明显增加; 2017~2018 年间闪电频次下降, 分布在南部区域, 北部和中部区域少有闪电, 平均频次在 5~10 次。

根据图 2 可以得出相关结论, 闪电频次的分布近似呈周期性变化, 3 年为一个周期, 每 3 年会达到闪电频次的峰值。由于山脉、盆地地形的影响, 闪电频次大的区域主要在研究区域的南部和西部, 在达到周期峰值的年份部分区域在 6~8 月闪电次数约为 10 次, 且中部平均达到 10 次左右, 在周期内非峰值的年份, 闪电频次较少, 且主要分布在研究区域的东南部, 最大值在 10 次左右。造成这种分布的原因可能与季风环流、地形结构有关, 山脉背部的地区由于山脉海拔较高阻挡了部分水汽, 导致雷电系统、降水系统受到一定的影响, 不能够发展下去, 所以闪电频次相较于其他地区会少, 而热力对流旺盛的地区, 雷暴系统容易发展, 对流活动明显, 地闪频率会大些。

4. 四川盆地闪电活动时间分布

雷电流幅值与雷暴日呈负相关关系。春季的雷电活动明显多于秋季, 这主要是四月和五月期间西南季风已经开始形成, 对流性云系增多, 西太平洋副热带高压第一次北跳, 副热带高压通常稳定跃过 200 N, 而徘徊于 20°N~25°N 之间, 这时四川开始进入大暴雨频发时期。在仲夏季节, 当副热带高压第二次北跳跨越 25°N 以北时, 四川盆地便进入了一个暴雨期, 大约在 7 月底至 8 月初, 此时副热带高压达到了其极盛阶段, 脊线也达到了最北位置, 暴雨带来了大量的闪电活动。此外, 夏季副高还与梅雨锋相伴出现, 当梅雨期结束时, 副热带高压减弱为低压系统, 同时伴随着强雷暴天气过程。此刻, 我国东南沿海正遭受着大量台风的侵袭, 而这些台风在穿越西南地区时, 也会引发局部强烈的对流现象, 从而导致大量的闪电活动。

4.1. 四川盆地闪电活动年变化

四川省位于我国西南部的长江上游, 特殊的自然环境也导致了四川省一直作为中国一个最大雷电天气区域的地方, 而此次调查的空间地域范围约为 27.5°N~33°N, 即 103 型~106°E 的范围, 数据源、地闪定位等信息均取自于中国闪电定位网, 而其它的部分数据则取自于欧洲中尺度预报组织(ECMWF)的 ERA 5 再分数据。通过统计地表温度、相对湿度等参数绘制图片进行分析。

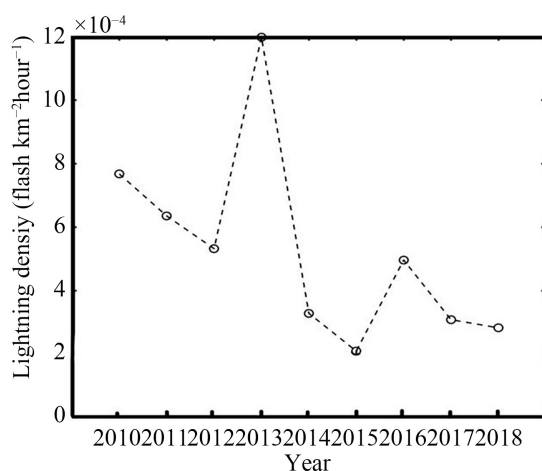


Figure 3. Lightning density distribution in Sichuan Basin from 2010 to 2018

图 3. 四川盆地 2010~2018 年闪电密度分布图

图 3 是四川盆地地区 2010~2018 年闪电活动的密度变化, 从图中可以看出, 2010~2012 年闪电密度缓慢下降, 从 $8 \text{ fl/km}^2 \text{ h}$ 降低到 $5 \text{ fl/km}^2 \text{ h}$ 左右, 在 2013 年闪电密度迅速上升, 达到峰值 $12 \text{ fl/km}^2 \text{ h}$, 在 2014 年又迅速下降, 2015 年达到最小值 $2 \text{ fl/km}^2 \text{ h}$, 在 2016~2018 有较小的波动, 但均没有超过 $6 \text{ fl/km}^2 \text{ h}$ 。闪电活动的年变化特征明显, 在 2013 年的峰值阶段内, 可以根据四川盆地的地形特征和产业特征进行分析。从雷电发生的位置分析, 四川省雷电分布和地势有很大的关系。盆地地区雷电密度值较高, 高原地区雷电密度值较低, 盆地到高原的过渡区域、盆地内的丘陵地区是雷电密度最高的区域。从产业活动分析, 该时期的四川地区正值科学技术的发展上升期, 工业化水平逐渐提高, 随着全球变暖和工业化程度的发展, 四川地区植被受到一定程度的破坏, 此外还有对流等因素的影响, 使得四川地区的闪电数量在一定年限达到峰值, 随着环境整治与人们对气候变化的应对措施的增加, 闪电密度趋于平稳, 大气状况得到改善。

4.2. 四川盆地闪电活动日变化

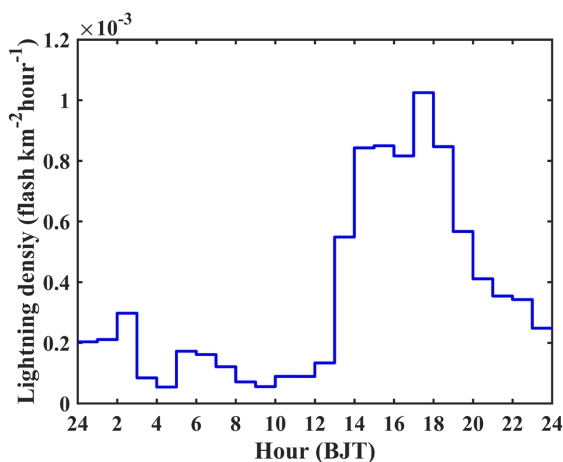


Figure 4. Daily variation density curve of lightning activity from June to August 2010 to 2014

图 4. 2010~2014 年 6~8 月闪电活动某日变化密度曲线图

对流日变化的性质也能够利用闪电日变化规律来表现, 而这些变化规律和对流运动的发展变化规律相互契合。对流运动一般从午后开始出现, 并于傍晚时分到达最强。另外, 在午夜前, 中国西南地区的

雷电活动已超过了当日平均值, 而夜晚则雷暴频发, 这一情况也独具特色, 与中国其他地方的雷电日平均情况迥异。

图 4 为 2010~2018 年 6~8 月某日的闪电日变化图, 从图中可以看出, 0 时~12 时闪电活动不频繁, 闪电密度较小, 起伏不大, 在 $0.4 \text{ fl/km}^2 \text{ h}$ 以下, 在 12 时到 18 时是闪电活动最活跃的时间段, 在 18 时闪电密度达峰值, 即 $1 \text{ fl/km}^2 \text{ h}$, 在 18 时以后闪电活动不断减小, 一直到次日 12 时。四川省 2010~2018 年 6~8 月的闪电活动主要集中在 12~20 时, 该时间段是夏季闪电高发时间, 占全天闪电发生的 80% 以上。根据日变化特征, 可以看出从西南到东北方向上, 随着时间延长, 雷电日数减少而平均闪电密度增大。造成此种结果的根本原因在于地形的作用, 尤其是在盆地地形中, 由于热力差异, 局部和地方性的山谷风环流表现得尤为显著。当山脉抬升时, 山区强烈辐散, 大气处于不稳定状态, 产生剧烈而频繁的暴雨过程。在白天, 由于受到高山谷风的影响, 在河谷和盆地的中、上部得到了大量降水气流的补给, 从而导致云雨活动减弱或受到了抑制, 从而大大减少了降水。而到了晚上, 高山风又迫使底层的暖空气上升, 从而促进了强对流的运动; 同时高层急流的耗冷量也从西南向东南转移, 并通过垂直移动而产生的大量电荷向上积聚, 导致与低层发生了强烈辐合, 从而形成暴雨的中尺度气候系统。其次, 虽然我国西南地区大风, 但因为准静止锋的影响, 云顶十分厚实, 所以白天地面温度的上升并不强烈, 大气层结的比较稳定, 所以雨量也相对较小; 但因为夜间云顶的辐射冷却速度加快, 所以低层的降温又受到了控制, 使地面温度的变化急剧增大, 又因此促进了不稳定的大气层结的形成, 这也是夜间雷电频繁发生的主要原因。

5. 四川盆地闪电活动的其他参数分布

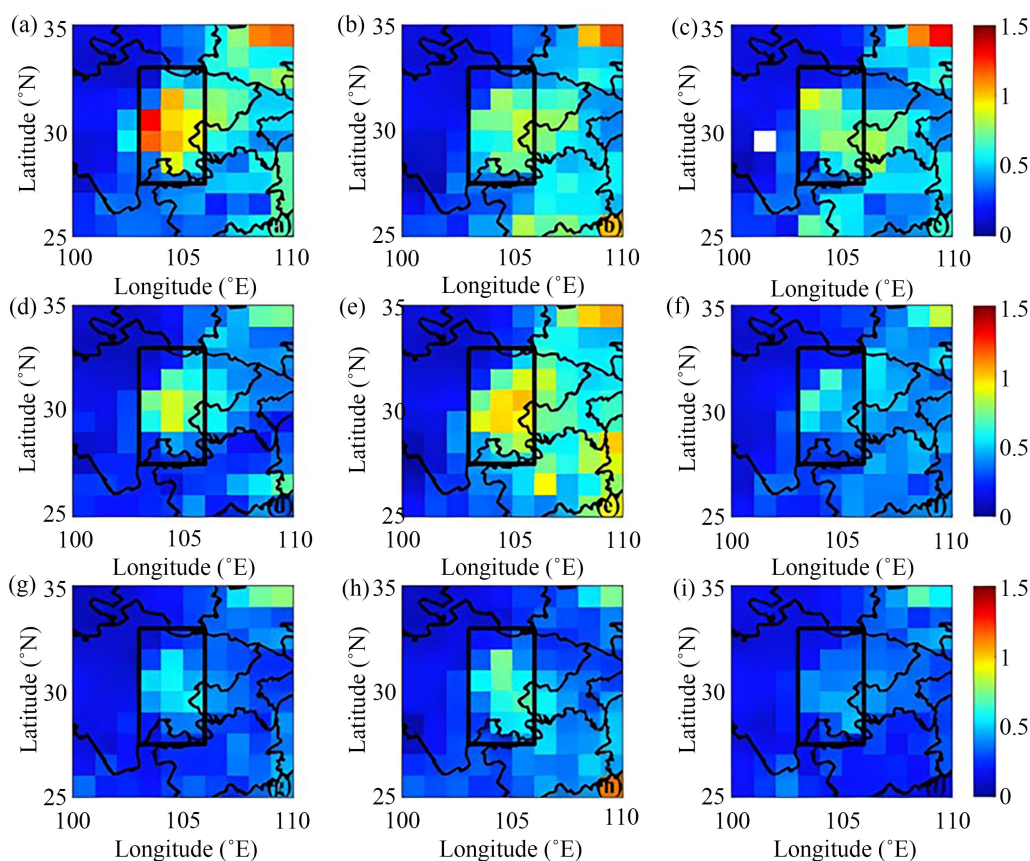
5.1. 气溶胶分布对闪电活动的作用

气溶胶散射是一类由固体或液体粒子在气介质中悬浮产生的气态扩散体系。由于大气运动的作用, 它们会聚集并沉降到地面上而产生气溶胶粒子。气溶胶的颗粒尺寸通常介于 $0.01\sim 10 \mu\text{m}$ 之间。研究发现当 $\text{PM}_{2.5}$ 在一定的浓度范围内, 闪电活动与其呈正相关, 在这个时候气溶胶增强闪电活动的途径是通过云微物理过程实现的。

四川盆地处于青藏高原的背风坡, 被高山和高原所环绕, 其受到背风坡“避风港”效应的显著影响(郭晓梅[20], 2016)。由于该地区地形复杂、植被稀疏、人类活动强烈, 导致地面辐射平衡失调, 造成地表反照率降低, 从而增加了气溶胶粒子浓度, 闪电密度也随着气溶胶浓度的变化而变化。因此, 利用四川地区观测到的气溶胶粒径谱分布数据, 采用 MODIS (中分辨率成像光谱仪)对相关区域进行了监测。通过监测气溶胶浓度, 找到其与闪电活动参数之间的关系。

MODIS 的探测长度达 2330 km, 每隔一至二天便能观察到世界的全貌, 以便在世界范围内不断补充土地、海洋与大气方面的观察资料。该方法能够有效获取地面辐射传输过程中各种信息, 并以不同形式展现出来。MCD12C1 产品根据 Terra 和 Aqua 卫星对探测所获取的土壤信息进行处理后得出的地表覆盖模型, 能够提供闪电活动的空间位置信息。

图 5 是 2010~2018 年 6~8 月 MODIS 的 $1^\circ \times 1^\circ$ 空间分辨率下四川盆地 550 nm 气溶胶光学深度(AOD)空间分布图, 从图中可以看出, 2010 年, 气溶胶含量较高, 西部地区可达 $1.5 \mu\text{m}$, 2011~2013 年气溶胶含量有所下降, 中部地区含量相对较高, 在 $1 \mu\text{m}$ 左右, 由于中部地区深处内陆, 受到大气环流的影响较小, 因此含量相对较高; 2014 年气溶胶含量增加, 中部地区在 $1 \mu\text{m}$ 以上, 四周多数地区在 $0.5 \mu\text{m}$ 左右; 2015~2018 年气溶胶含量明显下降, 在 2017 年极少数地区含量短暂上升之后, 2018 年降至最低, 平均浓度在 $0.5 \mu\text{m}$ 以下。



注: AOD 数据采用 92 天移动平均线处理, 计算出 92 天(6、7、8 月)的平均值, 代表每年夏季 AOD 的值。

Figure 5. Spatial distribution of aerosol optical thickness (AOD) at 550 nm over the Sichuan Basin at $1^\circ \times 1^\circ$ spatial resolution (a~i) for MODIS from June to August 2010: 2010~2018

图 5. 2010~2018 年 6~8 月 MODIS 的 $1^\circ \times 1^\circ$ 空间分辨率下四川盆地 550 nm 气溶胶光学厚度(AOD) 空间分布(a~i): 2010~2018

气溶胶影响闪电活动的发生过程很复杂, 气溶胶影响云凝结核使得雷暴云内微物理过程改变, 云内降水粒子的起电机理加强, 云内电荷分布和结构改变, 导致闪电增多; 而当其浓度显著增加并高于一定阈值时, 辐射效应明显, 使大气不稳定性降低, 对流活动减弱, 闪电减少。夏天, 随着大气上升运动越来越显著, 气溶胶散射的能量分布也很高, 部分气溶胶散射可传输至天山山脉和青藏高原主体, 甚至在 8 km 高空, 因此在四川盆地地区夏季闪电高发; 冬季, 随着气温降低, 大气中气溶胶浓度迅速增加并逐渐趋于饱和, 所以闪电活动也随之下降, 闪电密度小。

5.2. 垂直风切变对闪电活动的作用

由于青藏高原大地形的影响, 闪电活动的动力学参数繁多, 导致高原东南侧的对流层低层在冬季、春季和夏季均呈现出西南风的盛行趋势, 而在秋季则呈现出东南风的盛行态势。由于这种风向上的差异, 使它们之间有可能发生相互转换。四川盆地位于青藏高原东侧, 闪电活动都会受到由东向西的气流的影响, 该气流在四川盆地内形成了一个深刻的气旋性涡旋, 为该地区的大气环流提供了重要的动力, 为闪电活动的发生奠定了基础。青藏高原南支绕流所带来的正相对涡度输送, 以及盆地独特的下凹地形, 共同促成了气旋性涡旋的生成, 从而使得该时间段的闪电密度增大。当气流流经该弱涡时, 会出现明显的

辐合上升运动, 并产生较强的垂直风切变。可见, 气旋性涡旋长年控制着四川盆地中东部对流层中低层(105°E、108°E)。四川盆地的涡旋并非仅限于冬季和春季, 而是在夏季和秋季同样存在, 与闪电活动的季节性变化相关, 只不过其强度相对于冬春季有所减弱。此外, 还发现雷暴发生时伴随强烈的垂直风切变场以及明显的雷电现象。因此, 深入探究闪电活动与垂直风切变之间的相互作用, 是一项具有重要意义的研究领域。

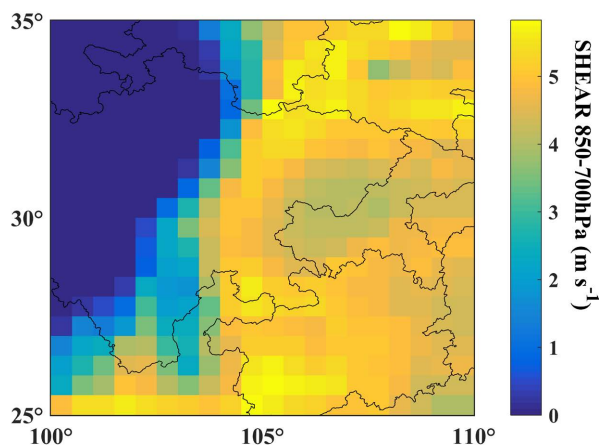


Figure 6. Vertical wind shear in the lower troposphere from June to August 2010 to 2018
图 6. 2010~2018 年 6~8 月对流层下层垂直风切变图

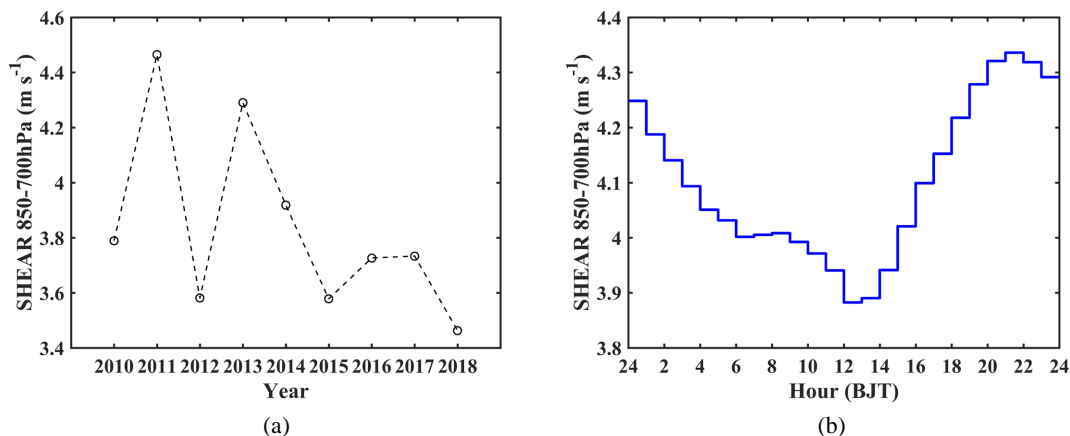


Figure 7. Vertical wind shear variation chart of lower troposphere from June to August 2010 to 2018. (a) Annual vertical wind shear variation chart of lower troposphere from June to August 2010 to 2018; (b) diurnal chart of vertical wind shear in the lower troposphere from June to August 2010 to 2018

图 7. 2010~2018 年 6~8 月对流层下层垂直风切变变化图。(a) 2010~2018 年 6~8 月对流层下层垂直风切变年变化图; (b) 2010~2018 年 6~8 月对流层下层垂直风切变日变化图

根据图 6, 850~700 hPa 高度层可以视为对流层下层, 我们可以直观地看出四川地区风切变的年、日变化, 由图 7(a)可以看出, 西部地区的垂直风切变强度较大, 中部、东部地区相对较小, 总体来说相差不大。通过图 7(a), 图 7(b)可以得出结论, 2010~2018 的风切变波动性下降, 而一日之中风切变的强度呈先下降, 在 12 时左右达到最小值, 随后逐渐上升。风切变较弱时, 相对风暴气流增量较小, 不足以使水汽远离上升气流区, 降水在气流作用下降落, 进入风暴低层的入流区, 从而使得水负载的明显增加, 导

致雷电、风暴等的减少或消失。而在空气中水汽较强的夜间或者日出前, 中等或较强的垂直风切变有利于相对风暴气流的发展, 此时, 气块携带着降水远离风暴的入流区或上升区, 中等到强的垂直风切变能够产生与阵风锋相匹配的雷暴活动, 从而使得暖湿气流源源不断地输送到发展中的上升气流中去, 垂直风切变的增强有利于上升气流和下沉气流在相当长的时间内共存, 新单体将在前期单体的有利一侧有规则地形成, 如果足够强的垂直风切变伸展到风暴的中层, 则产生于上升气流和垂直风切变环境相互作用的动力过程能强烈影响风暴的结构和发展, 在这种风切变环境下, 有利于组织完好的对流风暴如强烈多单体风暴和超级单体风暴的发展, 从而为闪电的产生提供了有利条件。

5.3. CAPE 值分布对闪电活动的作用

在西风带中, 四川盆地所处的青藏高原下游地区, 闪电活动对热力参数的影响相当显著。由于地形作用以及高原对流层中低层辐合上升气流等因素导致了该地区夏季风期间强烈的雷暴和暴雨天气。四川盆地降水日变化受到青藏高原上空大气环流的显著影响, 而这种环流变化与气温息息相关。对 2010~2018 年 6~8 月的资料进行研究整理时, 人们认为 CAPE 值是一种带有明显物理作用的热力不平衡参数, 它表达了自由对流高度和平衡长度间的比例关系, 即气块由正浮力作功, 将势能转化为动能的“能量”大小, 该大小与 $T-\ln P$ 图上的正面积成正比。因此, 随着 CAPE 的增大, 对流态的演化呈现出越来越高的趋势, 从而导致对流强度的增强。

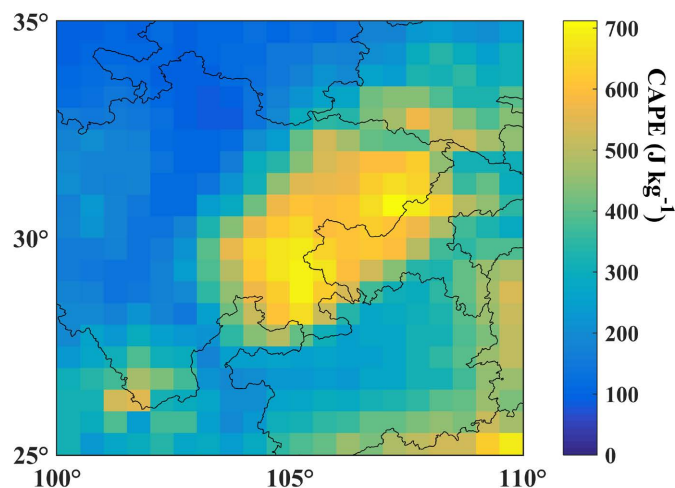


Figure 8. Spatial distribution of CAPE value from June to August 2010 to 2018

图 8. 2010~2018 年 6~8 月 CAPE 值空间分布图

由图 8 可知, 在所选区域内, CAPE 值呈现四周高中间低的趋势, 表现了各年四川盆地近地面的 CAPE 值变化。虽然 CAPE 值在各季节的差异非常大, 但是在各季节却都表现出了一致的日变化。CAPE 值变化幅度最大的区域是西北部, 其次是东部, 中部地区变化最小, 通过对对流有效位能的分析, 我们可以直观的看出, 中部地区空气对流活动较小, 原因是深处内陆, 气流经过周边地形的减弱, 此外四川地区白天近地面温度要比夜间暖得多。这种截然不同的温度变化对环流的日变化有重要影响, 夏季高原东南侧的西南急流在夜间增强就与此有关。总体上, 不同年份同纬度山的背风坡和相邻陆地 CAPE 值很接近, 但不同于闪电密度, 近海海域的 CAPE 要大于相邻陆地。同纬度, 四个区域 CAPE 值的差异没有它们的闪电活动差异明显, 前两者与后两者的 CAPE。

图 9(a)和图 9(b)是研究的九年中 CAPE 值的年变化和日变化。

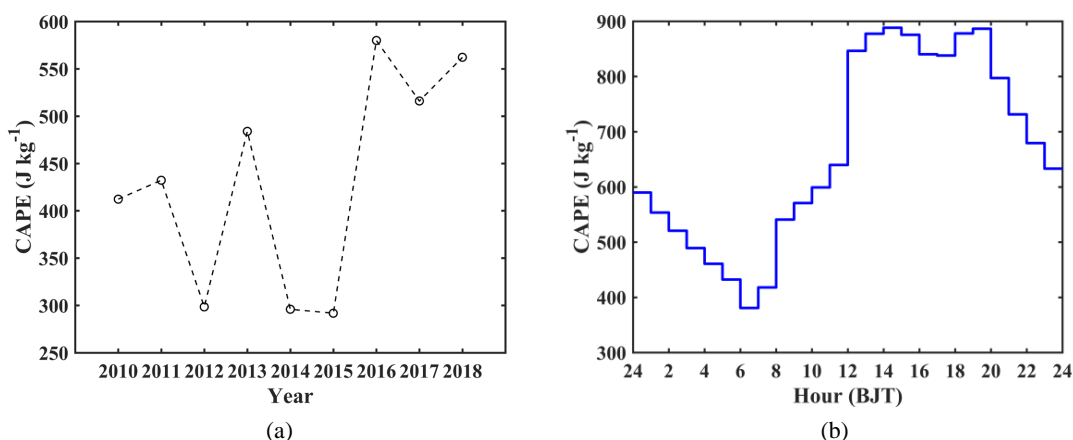


Figure 9. Changes in CAPE value from June to August 2010 to 2018. (a) CAPE value from June to August 2010 to 2018 (annual changes); (b) CAPE value from June to August 2010 to 2018 (daily change)

图 9. 2010~2018 年 6~8 月 CAPE 值变化图。(a) 2010~2018 年 6~8 月 CAPE 值(年变化); (b) 2010~2018 年 6~8 月 CAPE 值(日变化)

CAPE 值的年变化波动明显, 通过上述研究得出了四川地区闪电活动与 CAPE 年、日变化的关系, 为了进一步探讨二者的关系, 图 9(a)和图 9(b)给出了 1995~2014 年 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ 四川地区年、日平均闪电密度的相关系数分布图。总体上, 四川盆地地区的 CAPE 与闪电密度呈明显正相关, CAPE 越大, 闪电密度越高, 闪电活动越活跃。在年变化图中我们可以看出 CAPE 值在闪电频次较少的 2014~2015 年达到最小值, 随后急剧上升, 而在一日之内的 12~20 时是闪电活动的高峰期, 主要闪电都集中在这个时间段, 所以在日变化图达到峰值。

5.4. 地表温度、湿度变化对闪电活动的作用

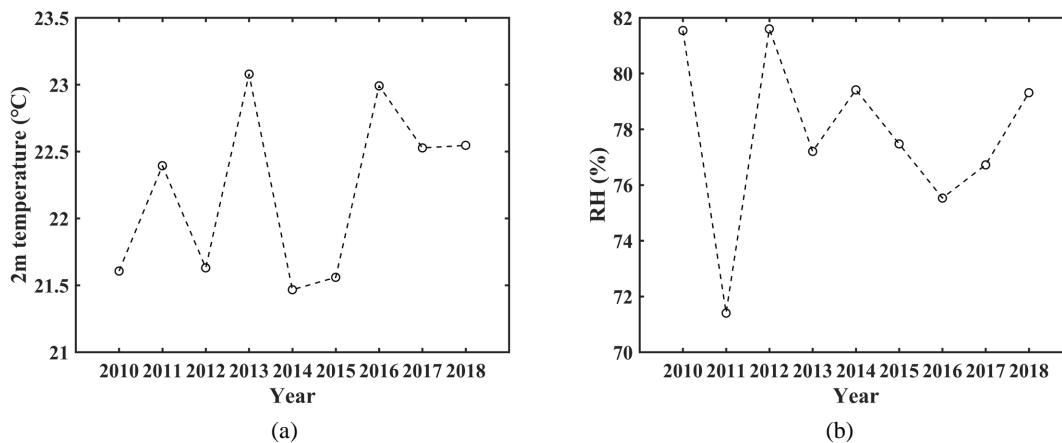


Figure 10. Annual variations of temperature and humidity in the study area from June to August 2010 to 2018. (a) Surface temperature in the study area from June to August 2010 to 2018; (b) humidity characteristics of lightning activity from June to August 2010 to 2018

图 10. 2010~2018 年 6~8 月研究地区温度、湿度年变化图。(a) 2010~2018 年 6~8 月研究区域地表温度; (b) 2010~2018 年 6~8 月闪电活动湿度特征

图 10(a)是 2010~2018 年 6~8 月地表温度的变化图, 从图中可以看出, 该地区九年间温度波动明显。2010 年该地区地表温度约为 21.5℃, 在 2011 年上升到 22℃之后, 在 2013 年达到峰值 23℃, 随后急剧

下降到 21℃, 在 2016 年出现第二个峰值 23℃, 在 2017~2018 有所下降, 最终趋于平稳, 在 22.5℃ 左右。可见在九年中闪电频率高的年份地表温度大, 闪电频率中等或者较少的地区地表温度较低, 原因是闪电中含有极强的电流, 当产生闪击活动的时候电流对地放电, 根据电流的热效应会使地表温度升高, 闪电频率与地表温度近似呈正相关的关系。

由于在对不同区域雷电活动和该区域水蒸气活动关联的调查中表明, 700~400 hpa 的平均相对湿度和雷电活动的关联性都很好, 所以本文主要采用了 700~400 hpa 的平均相对湿度来分析南太平洋地区相对湿度和雷电活动之间的关联。图 10(b) 为 2010~2018 年 6~8 月闪电活动的适度趋势图, 从图中可以直观地看出, 2010、2012 年适度均达到峰值 82%, 由于闪电活动会带来大量的降水, 而第二章分析得出闪电频次的年份变化, 因此闪电密度大、频次高的年份湿度会相对较大, 而从 2013 年开始, 湿度有了规律性的波动, 这是由于闪电频次趋于平稳, 因此闪电带来的降水也趋于平均。

综合考虑闪电活动温度、湿度的年变化关系, 研究发现 700~400 hpa 平均相对湿度变化在内陆、远海和背风坡的地区的闪电密度随着温度的升高而增大。内陆区域闪电活动与温度的关系不如其他三者明显, 但总体还是呈上升的趋势。其中, 相邻陆地对温度的响应最为明显, 闪电密度值随温度升高的过程中均匀上升, 没有下降的趋势。山背地区, 闪电温度特征在 2014 年时明显下降, 随后明显上升。闪电密度在温度小于 21℃ 之前上升趋势较为明显。总的来说闪电密度随温度的上升而增大, 在温度 15~22.5℃ 区间有一段下降的趋势, 但变化幅度不大。线性拟合后, 相邻陆地的斜率最高, 远海最低, 即陆地对温度的响应最明显。而 700~400 hpa 平均相对湿度对不同地区的闪电活动产生的影响不同。陆地和远海地区, 闪电密度随相对湿度的变化均呈明显的先升高再降低再升高的趋势, 闪电密度先升高至相对湿度为 80%, 后降低至相对湿度 70% 时再升高。

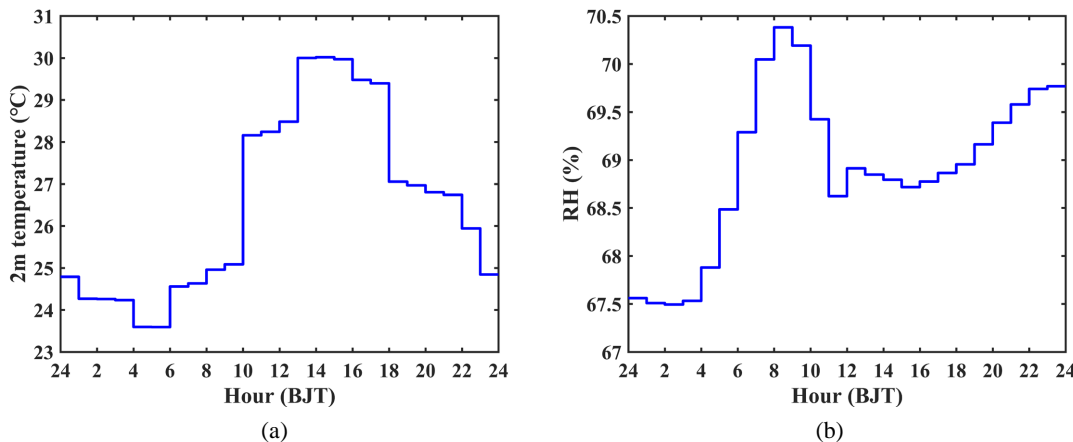


Figure 11. Daily variations of temperature and humidity in the study area from June to August 2010 to 2018. (a) Surface temperature in the study area from June to August 2010 to 2018; (b) surface humidity in the study area from June to August 2010 to 2018

图 11. 2010~2018 年 6~8 月研究地区温度、湿度日变化图。(a) 2010~2018 年 6~8 月研究区域地表温度; (b) 2010~2018 年 6~8 月研究区域地表湿度

图 11(a) 和图 11(b) 描述了研究区域闪电活动温度、湿度的日变化特征, 从图中我们可以看出, 温度湿度变化特征不具有一致性, 温度在 0~10 时趋于平稳, 保持在 25℃ 以下, 在 14 时达峰值 30℃, 后逐渐下降; 湿度在 0~9 时逐渐上升达峰值 70%, 后在 10~12 时逐渐下降至 68.5%, 随后逐渐缓慢上升。造成这样的原因主要是在日出之前空气中的水汽会以露、雾等形式悬浮在空气中, 温度、湿度逐渐增加, 湿度增加的速率高于温度, 在雷电的影响下, 降水增多, 对流活动强, 故在午后时段温度, 湿度均达到峰

值, 随后温度下降, 湿度在晚间缓慢回升。

温度、湿度在地平均闪电密度的日变化呈现单峰单谷特征, 在早晨较小, 在下午至傍晚较大, 一般来说闪电在日出后的早上发生的频率最低, 特别是在日出前后的几个小时, 因此谷值在 5 时左右。其峰值一般在 14 时左右, 峰值的形成一方面是因为地面受到阳光加热的影响, 而雷阵雨则一般从午后开始活动, 并且一直延续到傍晚时分, 但是对四川盆地这样的特殊地貌区而言, 内陆风锋一般从下午开始向横断山脉的背风坡传播发展和加强。内陆和背山区域最大谷值和最大峰值出现的时间分别滞后和提前于相邻陆地约 1 小时, 次峰值出现在 18 时左右, 次谷值出现在 22 时左右。

在四川盆地, 从日落之后到日出之前, 地表附近的大气将持续经历一段时间的降温过程。在深夜时分, 随着气温的逐渐降低, 高原附近的地表将会出现下沉和辐散现象。同时, 冷暖空气交汇于盆地上空。盆地中央形成了一个相对较暖的气团, 这是由于云贵高原东南侧的暖气流进入该区域所致。沿着东坡方向, 青藏高原所受冷空气在盆地大气低层形成了一种绝热加热的现象。在盆地东部, 随着暖空气的上升, 大气的不稳定性得到了进一步的加强。由于地形作用, 西部地区的冷高压比东部要弱一些, 因此在闪电分布图是西部的闪电频次也高于东部。在青藏高原的后半夜, 由于强烈的冷却和辐散作用, 冷空气向周围运动, 导致盆地上空的中低层大气形成了一股冷平流, 冷平流对高原北部地区产生反气旋性环流。当盆地中东部的低层暖空气上升时, 若遇到中层冷平流, 这将为大气不稳定的形成提供有利条件, 从而促进闪电活动的发生。

6. 结论

本文根据 2010~2018 年 6~8 月的闪电活动数据, 从地理分布、时间分布、气溶胶分布、热力学、动力学分布五个方面分析了四川盆地地区闪电活动的不同特征, 结合观测数据绘制图片, 结合当地地形分析分布原因, 得出以下结论:

1) 四川盆地地区闪电空间分布不均匀, 四川地区闪电主要分布在西部和南部, 闪电频次较大的也是这些区域; 四川盆地闪电频次呈近似周期性起伏, 在 2013 年达到这九年的峰值, 三个月内的闪电数接近 30 次, 达到九年中的最大值。四川地区的闪电活动在温度、湿度条件不同的时候会显现出不同的特征, 闪电多发生在降水充足的夏季, 一天之中集中在日出前后以及 12~20 时, 湿度增加的速率高于温度。

2) 靠近横断山脉的一侧由于山脉海拔高度较高, 对于水汽的削弱作用会影响到闪电的频次, 从而靠近山坡背面的一侧地带闪电较少, 而对流强烈的地域由于没有高大山脉的阻挡, 闪电系统容易形成, 因此闪电主要集中在东南部对流活动强烈的盆地地区; 在中部地区由于深处内陆水汽较少, 大气环流影响较小, 因此闪电系统形成受到阻碍, 闪电频次较低。

不同地域的闪电活动存在显著差异, 雷暴的发生呈现出强烈的局部性。由于当地的地形地势、水汽和地理环境等多种因素的影响, 气溶胶的年度分布和季节变化密切相关。四川盆地是气溶胶高值区, 而闪电活动则主要分布在气溶胶高值区。在四川盆地地区, CAPE 值与闪电密度之间存在着显著的正相关关系, 即 CAPE 值的增大会导致闪电密度的增加, 从而促进闪电活动的活跃。

参考文献

- [1] 朱蓓孝, 袁铁. 中国地区地形对闪电分布的影响[C]//第七届长三角科技论坛能源分论坛——长三角气象科技论坛论文集. 嘉兴: 气象出版社, 2010: 470-47.
- [2] 周筠珺, 孙凌, 杨静, 胡初阳. 中国西南及其周边地区雷电活动的特征分析[J]. 高电压技术, 2009(6): 1309-1315.
- [3] 周筠珺, 杜克磊, 孙凌. 我国中部地貌过渡带的雷电特征[J]. 高电压技术, 2008, 34(7): 1347-1352.
- [4] 郗秀书, 周筠珺, 袁铁. 卫星观测到的全球闪电活动及其地域差异[J]. 地球物理学报, 2003, 46(6): 743-750.
- [5] 郗秀书, 袁铁, 谢毅然, 马耀明. 青藏高原闪电活动的时空分布特征[J]. 地球物理学报, 2004, 47(6): 997-1002.

- [6] 戴建华, 秦虹, 郑杰. 用 TRMM/LIS 资料分析长江三角洲地区的闪电活动[J]. 应用气象学报, 2005, 16(6): 728-736.
- [7] 陈春梅, 陈绍炳, 唐嘉佩, 陈以华. 四川宜宾泸州长江河谷地带雷电监测数据特征分析[J]. 农业与技术, 2016, 36(20): 227-228.
- [8] 王赟, 周龙, 王洪祥, 等. 基于地形因子的水库区域闪电特征分析[J]. 水电能源科学, 2016, 34(4): 207-210, 190.
- [9] 李家启, 吉莉, 李强, 黄亚敏, 贺显友. 基于闪电定位系统的重庆地区闪电日分布特征分析[J]. 西南师范大学学报(自然科学版), 2013, 38(11): 109-115.
- [10] 冯鹤, 臧舒, 杨蕊. 太行山地形因素对雷电分布的影响[J]. 科技与创新, 2022(10): 106-109.
- [11] 范仲之, 付雅婷. 山西省闪电活动时空特征及其与地形的相关性分析[J]. 广东气象, 2017, 39(4): 69-72.
- [12] 童杭伟, 范国武, 王海涛. 浙江省雷电活动的特点及其与地形和气候的关系[J]. 电网技术, 2008, 32(11): 99-100.
- [13] 赵生昊, 覃彬全, 刘青松. 重庆市地形对雷电灾害主要致灾因子影响分析[J]. 气象科技, 2020, 48(1): 127-131.
- [14] 王学良, 张科杰, 余田野, 汪姿荷. 湖北省山区与平原雷电分布及其参数特征[J]. 气象科技, 2019, 47(2): 337-348.
- [15] 余建华, 刘海兵. 江西强雷电活动分布与地形及其土地利用的相关性[J]. 气象科技, 2020, 48(6): 898-902.
- [16] Zipser, E.J., Cecil, D.J., Liu, C.T., Nesbitt, S.W. and Yorty, D.P. (2006) Where Are the Most Intense Thunderstorms on Earth? *Bulletin of the American Meteorological Society*, **87**, 1057-1072.
- [17] 黄凯莉, 张其林, 陈隆, 冯建伟. 真实地形地貌对闪电定位系统的影响[J]. 电瓷避雷器, 2018(3): 121-128.
- [18] 张其林, 张源源, 李东帅, 樊艳峰, 高金阁. 地形地表的 irregular 起伏对雷电电磁场传输的影响[J]. 气象学报, 2013, 71(2): 357-365.
- [19] 张源源, 孙琪, 庞华基, 王欣眉, 徐晓亮. 真实地形地表对闪电定位精度的影响[C]//雷电委员会, 中国气象科学研究院. 第 31 届中国气象学会年会 S9 第十二届防雷减灾论坛——雷电物理防雷新技术. 青岛: 气象出版社, 2014: 7.
- [20] 郭晓梅. 四川盆地空气质量气候特征及其大地形影响效应的观测模拟研究[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京信息工程大学, 2016: 4-5.