

复杂地貌区域内的地闪特征分析

刘 畅¹, 赵鹏国¹, 周筠珺¹⁻⁴, 胡 荣¹, 瞿 婷¹

(1. 成都信息工程学院大气科学学院, 成都 610225; 2. 中国气象科学院灾害天气国家重点实验室, 北京 100081;

3. 中国科学院大气物理研究所中层大气与全球环境探测实验室, 北京 100029;

4. 西藏自治区气象局气象台, 拉萨 850000)

摘要: 根据 2005-2008 年四川雷电监测定位网测得的地闪及该时段内的相关天气资料, 运用气候学分析方法, 对地处复杂地貌区域内的四川及其周边临近区域的地闪特征进行研究。结果表明: 该地区地闪密度分布与其地貌特征有着较为密切的关联性, 年平均地闪密度在“川西高原—四川盆地—南部丘陵”依次形成由少到多逐渐增加的分布格局, 其最大值超过了 1 000 次/格点, 而年平均正地闪密度最大的区域主要位于甘孜州南部的稻城县, 其值则超过了 50 次/格点。在地闪发生的主要季节总地闪频数随纬度变化的最大值出现在北纬 30°附近, 这与 Hadley 与 Ferrel 环流在北纬 30°附近形成的下沉气流有关。各年逐月的正地闪占总地闪的百分率分布基本均呈“V”型。在川西高原以东区域的地闪日变化中夜间有两个平均地闪频数的峰值出现, 而在川西高原地区只有午后出现一个平均地闪频数的峰值。各雷暴过程中, 在冰雹直径 3~10 mm 的区间内, 平均正地闪百分比变化与冰雹直径呈正比; 最大的平均正地闪百分比 30%, 与 22 mm 的冰雹直径相对应; 16.98% 的平均正地闪百分比与 10 mm 的冰雹直径对应, 其出现的概率最大超过了 37%。

关键词: 复杂地貌区域; 地闪; Hadley 与 Ferrel 环流; 冰雹尺度; 正地闪百分比

中图分类号: TM86 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-1609(2011)01-0022-07

Characteristics of CG Lightning over Complex Landform Areas

LIU Chang¹, ZHAO Peng-guo¹, ZHOU Yun-jun¹⁻⁴, HU Rong¹, QU Xing¹

(1. College of Atmospheric Sciences, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China; 2. State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China; 3. Laboratory of Middle Atmosphere and Global Environment Observation, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China; 4. Observatory of the Weather Bureau in Tibet Autonomous Region, Lhasa 850000, China)

Abstract: By utilizing data of CG lightning from Lightning Monitoring Localization Network in Sichuan province and weather during the 2005-2008, a rather detailed study on characteristics of CG lightning over complex landform areas, which is in Sichuan province and its peripheral regions of China, has been carried out according to climatology analysis methods. Results show as follows. The distribution of CG lightning density correlates closely with the landform in research areas. The average annual density of total CG lightning increases from Western Sichuan Plateau to Sichuan Basin, and then to South hills in turn with the highest value over 1 000/grid, while the area with the highest one of positive CG lightning which is over 50/grid lies in Daocheng county of Ganzi state. The meridional highest frequency of total CG lightning is in the area with the latitude near 30°N in major thunderstorm seasons, and it is induced by subsidence flows of Hadley and Ferrel Cell at 30°N. Monthly percentages of positive CG lightning flashes

收稿日期: 2010-09-12; 修回日期: 2010-11-17

基金项目: 中国科学院知识创新工程领域前沿项目(IAP09314); 灾害天气国家重点实验室开放课题(2010-LASW-A08); 西藏强对流天气短时临近预报预警系统项目; 成都信息工程学院科研基金项目(CRF200903)。

Project Supported by Knowledge Innovation Program of the Chinese Academy of Sciences(IAP09314), Science Foundation of State Key Laboratory of Severe Weather of Chinese Academy of Meteorological Sciences (2010LASW-A08), Tibetan Short-term Nowcasting and Warning System for Strong Convective Weather Program, Science Foundation of Chengdu University of Information Technology (CRF200903).

in total ones for each year basically presents a “V” type. Two peak values of daily CG lightning frequency occur in east of the Western Sichuan Plateau at night, and just one peak value in Western Sichuan Plateau in afternoon. There is positive trend between mean percentages of positive CG lightning flashes and mean hail size as hail diameter increases from 3 to 10 mm. The highest average percentages of positive CG lightning flashes i.e. 30% corresponds with the 22 mm hail diameter, and the highest probability density is over 37% for 16.98% percentages of positive CG lightning flashes with 10 mm hail diameter.

Key words: complex landform areas; CG lightning; Hadley and Ferrel cell; hail size; percentages of positive CG lightning flashes

0 引言

雷电活动的区域性差异十分明显^[1-9],这与发生雷电区域的下垫面性质、气候特点及天气背景等都有着密切的关系,而就各区域雷电特征的了解也一直是学术界研究的重要课题之一^[10-11]。

笔者选取四川及其周边临近地区进行研究,该区域内地貌类型复杂(主要有台地、高山、丘陵、平原、水面等),其主要位于中国大陆地貌3大阶梯中的第1级青藏高原和第2级长江中下游平原的过渡带,西高东低的特点明显。该区域受东南、西南和高原季风环流的交替影响,促使该区域气候类型独特^[12],其东部盆地属中亚热带和北亚热带湿润气候,其西部的川西高原则属于典型的高原气候;而东部盆地又是全国日照时数最少的区域,日照时数由西向东依次是:盆西 900~1 200 h,盆中 1 200~1 400 h,盆东 1 400~1 600 h^[13]。此外,该地区的天气系统在每年 3-10 月都会较为集中地出现,这对于雷暴天气的发生有着直接的影响^[14]。

该研究区域地貌特征、气候及天气较为复杂,雷电灾害明显,是中国雷电灾害多发区之一^[9,15]。笔者将着重对该区域内的地闪特征进行研究。

1 资料及其处理

研究中所用的资料为 2005-2008 年四川雷电监测定位网所取得的资料,该定位网由 18 个探测子站组成,见图 1,其站址分别为:广元、达川、南部、绵阳、成都、遂宁、雅安、自贡、西昌、越西、会理、木里、稻城、九龙、康定、甘孜、小金、红原,其中中心数据处理站建在四川省气象台和西昌卫星发射中心,互为备份,探测数据通过网络实现四川省气象局、防雷中心、成都信息工程学院数据共享。图 1 中内层灰色闭合曲线内为定位网探测效率大于 90% 的范围,外层灰色闭合曲线内为定位网探测效率大于 85% 的范围,而在其余区域的探测效率小于 85%。定位准确率的理论值为 500 m,通过对雷击事故点分析可知定位准确率在 2 000 m 以内^[16-17],文中所用资料没

有进行效率订正。

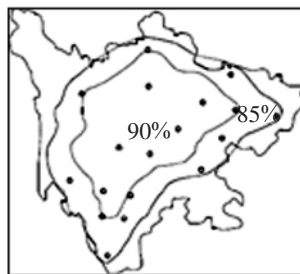


图 1 四川及其周边临近区域雷电监测定位网及其探测效率分布 (“○”为探测子站的位置)

Fig.1 Lightning detection and location network, as well as the distribution of its detection efficiency over Sichuan and its circumjacent nearby areas (“○” is the locations of detection stations)

在分析地闪的空间分布时,将北纬 26°~35°、东经 97°~109°划分成 91×121 的正方形网格,每个网格边距为 0.1°×0.1°,然后统计各网格内的地闪次数,以完成对地闪空间分布的分析。文中不仅进行了地闪的时空分布研究,而且还对地闪随各纬度的变化特征及地闪极性与雷暴危害性强度之间的关系进行了分析。

2 结果与讨论

2.1 地闪的空间分布

图 2 为 2005-2008 年总地闪密度的年平均分布及正地闪密度年平均分布,该研究区域地闪空间分布的区域性特征显著。由图 2(a)可知,该区域年平均地闪密度分布最高的区域主要位于中国地貌第 1 阶梯青藏高原边缘龙门山脉以东的各区域,即四川盆地及其以东区域,以及攀枝花地区。这些区域年平均地闪密度都在 320 次/格点以上,其中地处眉山与乐山地区交界的洪雅与夹江县附近的年平均地闪密度为最高,超过了 1 000 次/格点;而甘孜和阿坝地区是四川各地区中年平均地闪密度最小的区域,其中心值低于 160 次/格点;对于成都而言,大部分地区年平均密度在 160~320 次/格点之间。此外,如图 2(a)所示,在四川境内取 9 个典型区域,以利于

对地闪特性进行详细的讨论。

年平均正地闪密度的最大值比总地闪的小两个数量级,其分布特征与总地闪的相比有着显著的差别,见图 2(b),即:主要分布在川西高原以东的区域,而在高原上除了南部的稻城、雅江和理塘县等区域有少量的分布外,其他地区都少有正地闪发生。正地闪分布的大部分地区的年平均密度都大于 10 次/格点。年平均正地闪密度最大的区域主要位于甘孜州南部平均海拔超过 4 500 m 的稻城县,其值超过了 50 次/格点。此外处于龙门山脉东部边缘的安县与岁江县交界处的区域,年平均正地闪密度也较高,其值大于 25 次/格点。

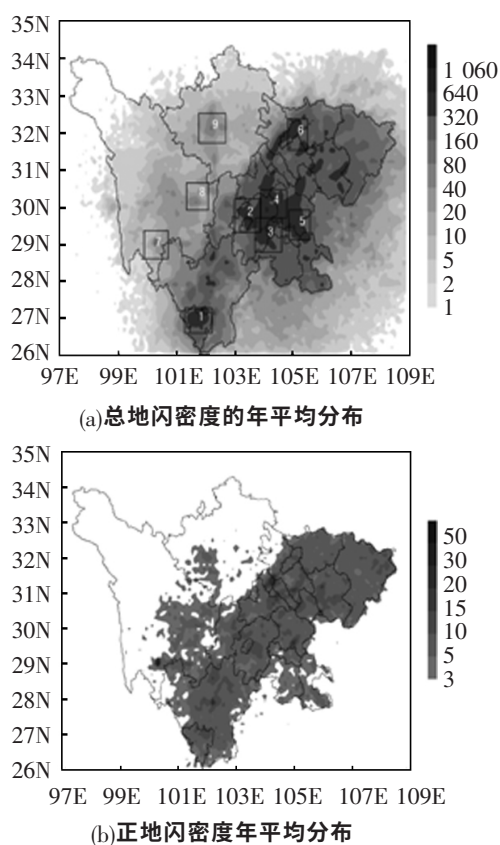


图 2 2005-2008 年总地闪密度的年平均分布及正地闪密度年平均分布(单位为:次/格点)

Fig.2 Distribution of average annual density of total CG lightning in 2005-2008

由以上的分析可知,四川境内的地闪平均密度的分布与该地区的地貌特征有着较为密切的关联性,主要表现为:川西高原地区地闪密度要比四川盆地的小,而盆地区域的又要小于南部丘陵区域的,形成“川西高原—四川盆地—南部丘陵”由少到多逐渐增加的分布格局。这一地闪分布特征的主要成因为:川西高原与四川盆地相比受季风的影响较小,其得到的水汽也要远远少于盆地区域,这使得该区域形成雷暴的水汽条件弱于盆地区域;盆地地形相

对其南部的丘陵及山地区域要平坦得多,虽然这里水汽条件充足,但不稳定能量的释放缺乏下垫面的扰动机制,因此该区域地闪密度并非是最大的区域;盆地南部的丘陵及山地区域,地形较为复杂,地势呈西高东低,最高海拔 3 522 m,最低海拔 335 m,一方面受西南和东南季风的影响该地区水汽充足,而另一方面气流自南(西南和东南)向北(东北和西北)输送的过程中,在地形的强迫下较易产生波动而促使不稳定能量快速释放,因此该区域是四川地闪密度分布最高的区域。就正地闪而言,最高的平均密度值出现在高海拔的高原地区,这与其他作者的研究结果也是一致的^[18-20]。

图 3 给出了 2005-2008 年四季平均总地闪密度分布。主要分布特点是:以夏季为主,夏季的总地闪密度的最大值均是春、秋季的 2 倍;春季与秋季相似,总地闪主要分布于川西高原的东部边缘及其以东的广大地区,春季的最大值位于南充地区以及盆地南部的内江和资阳的交界处;而秋季的最大值出现的范围远比春季的大得多,除了在盆地内的成都地区最大值范围较大,其向南延伸至攀枝花地区、向北延伸至巴中、向东延伸至资阳的东端,此外在德阳和绵阳的中部也有分布;夏季总地闪密度最大值主要分布于成都东南部、眉山和乐山地区的交界处、资阳地区的中部,以及绵阳和攀枝花地区北部;对于冬季而言,则只有零散的分布,其最大值出现在达州的南部。

四季地闪密度最大值的分布面积由多至少的季节依次是:夏、秋、春和冬。研究区域内年平均地闪密度位于眉山与乐山地区最大的值主要形成于夏季;而位于攀枝花地区的大值形成于夏、秋两季。

2.2 地闪在各纬度上的分布

地闪在各纬度上的分布有较大的差异。图 4 给出了 2005-2008 年在东经 100°~108°与北纬 26°~35°的范围内平均地闪频数在四季随纬度变化的分布。由图 4 可知,随着纬度由北纬 26°增加到 35°,平均地闪频数于四季中均出现了一个极大值;春、夏和秋都出现在北纬 0°附近,其值分别为 106、115 和 107;而冬季的极大值出现的纬度略低,为北纬 29.2°,其值也仅为 35。

在地闪发生的主要季节——春、夏和秋季,平均地闪频数的极大值均出现在北纬 30°,这与地球在经圈方向形成的环流有关。如图 4 所示,在经圈方向,由低纬度至高纬度,分别为 Hadley、Ferrel、Polar 环流,它们的环流方向分别为顺时针、逆时针及顺时针。在北纬 30°附近 Hadley 与 Ferrel 环流均

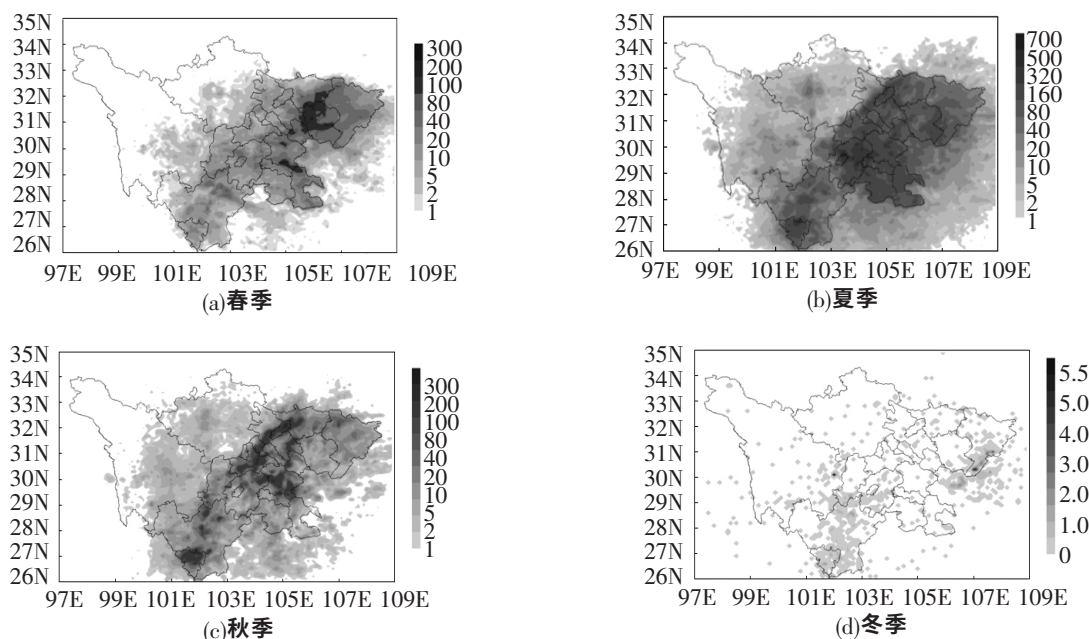


图3 2005-2008年四季平均总地闪密度分布(单位:次/格点)

Fig.3 Distribution of average seasonal density of total CG lightning in four seasons in 2005-2008

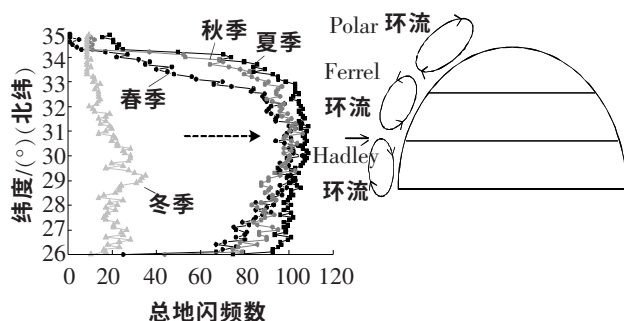


图4 2005-2008年四季平均总地闪频数随纬度的变化

Fig.4 Average variation of total CG lightning frequency with latitude in four seasons in 2005-2008

为下沉气流, 在这样的大气环流的背景下更易抑制系统性的天气出现, 而深层对流只能在局部出现。此外下沉气流还能够引起逆温, 逆温的形成可以使得湿球位温和近地面的水汽有时间得以累积, 近地面层水汽的增加会促使其吸收太阳短波辐射的能力增

强, 这还会使层结的不稳定能量增加, 进而使得该区域有更多机会出现强对流性天气。大气对流层中对流活动旺盛会“激活”上层的冰相粒子层, 从而会有更多的地闪发生^[21]。

2.3 地闪的时间分布

2005-2008年中, 地闪主要出现在3-10月。2005-2008年地闪逐月分布图见图5。由图5(a)可知, 各年逐月的负地闪的变化特征与四年平均值的分布特征基本相同, 最大值均出现在夏季的7月份, 且2008年的值最大为323 225次, 而2007年的值最小为61 844次, 平均为204 252次。各年次大值除了2008年, 其余各年的均出现在8月, 而2008年出现得较晚为9月, 其值为229 663次; 四年的平均次大值也出现在8月, 其值为106 655次。

各年逐月的正地闪的分布特征与负地闪相比, 存在着较大的差异。由图5(b)可知, 其中最大值出现

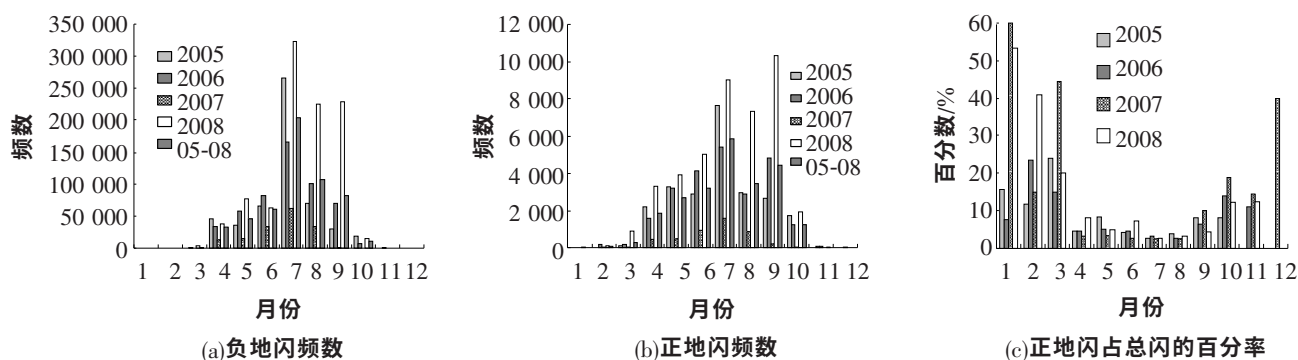


图5 2005-2008年地闪逐月分布

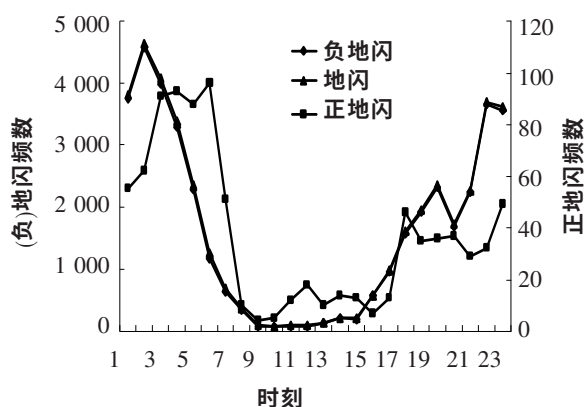
Fig.5 Monthly distribution of CG lightning in 2005-2008

在2008年9月,其值为10 306次;而其他3年的最大值均出现在7月,2005-2007年的最大值分别为7 641、5 411及1 608次。正地闪逐月的次大值出现的月份与负地闪的迥然不同,其中2005年出现在5月,其值为3 267;2006年出现在9月,其值为4 808;2007年出现在6月,其值为937。

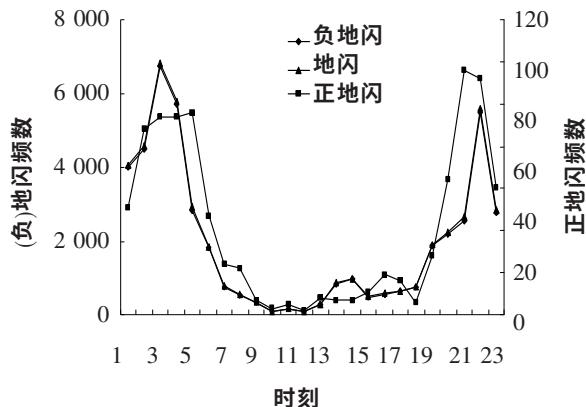
而由图5(c)可知,各年逐月的正地闪占总地闪的百分率分布基本呈“V”型,即:每一年正地闪的高比率月份主要在1-3月与10-12月,而在4-9月则相

对较低;其中比率最高的月份出现2007年的1月,其值为60%,其次是2008年1月的53%。而2007年的3月与12月的也相对较高,分别为44%和40%;此外2008年的2月份也达到了40%。正地闪比率最低的月份主要出现在7-8月,各年平均仅为3%;夏季只有6月略高些,但平均也只有5%。由此可见,正地闪在总地闪数较少的时出现的比率较高,即:正地闪比率与总地闪数呈反比。

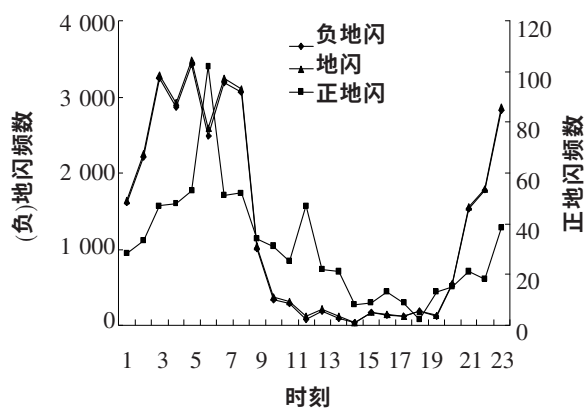
各典型区域平均地闪日变化见图6。



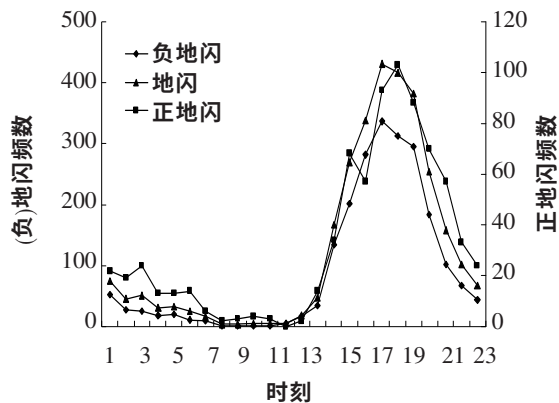
(a)(区域1)2005-2008年地闪平均日变化



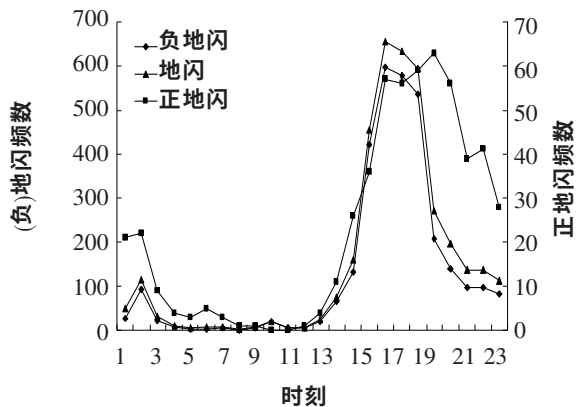
(b)(区域2)2005-2008年地闪平均日变化



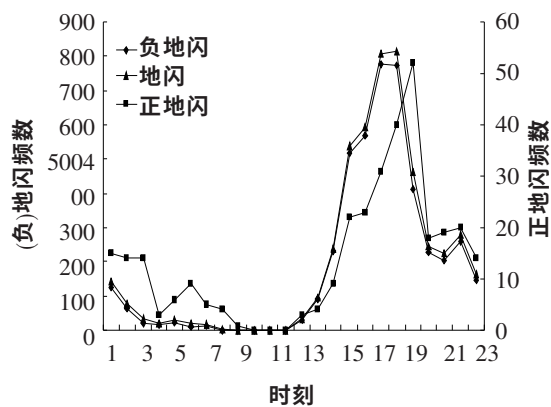
(c)(区域6)2005-2008年地闪平均日变化



(d)(区域7)2005-2008年地闪平均日变化



(e)(区域8)2005-2008年地闪平均日变化



(f)(区域9)2005-2008年地闪平均日变化

图6 各典型区域平均地闪日变化

Fig.6 Average daily variation of CG lightning in typical areas

图 6(a)、图 6(b)和图 6(c)分别为高原以东的区域 1、2 及 6 的平均地闪日变化,图 6(d)、图 6(e)和图 6(f)则分别为高原的区域 7、8 及 9 的平均地闪日变化。由图 6 可知,对于高原以东的区域平均地闪(包括:正、负地闪和总地闪)的日变化明显呈“双峰”结构,即:在 01:00~08:00 及 21:00~00:00 两个时间段内,均有平均地闪频数的极大值出现,区域 3、4 和 5 也具有同样的特征;而在高原上平均地闪的日变化为“单峰”结构,即:在午后 15:00~21:00 的时段内存在一个极大值。

由以上的分析可知,在川西高原以东的区域在日出之前及日落之后,各有一个平均地闪频数的峰值出现。这说明日平均地闪频数的峰值主要出现在夜间,而在日出后并未出现,形成这一特殊现象的原因与高原以东地区的气候条件有着密切的关系。川西高原东部区域属于中亚热带和北亚热带湿润气候,紧邻高原的四川盆地西部及其南北侧是中国日照最少的区域,即该区域常年为多云天气。由于云的存在,白天太阳的短波辐射比晴天时削弱得多,白天近地面层加热不明显,所以大气层结多数情况下较为稳定;夜晚时云的逆辐射作用较大,地面附近被加热,大气层结趋于不稳定,所以较易在夜间形成强对流天气。川西高原的情况则不同,该地区多数情况是少云的晴天;由于太阳短波辐射的作用,午后不稳定能量累积达到最大后,受扰动较易被释放,因而该时段易出现强对流天气过程。

2.4 地闪极性与雷暴危害性强度之间的关系

除去雷电,雷暴的危害性强度还可以利用雷暴天气中降落至地面的冰雹尺度来界定。在 2005-2008 年,研究区域中地面记录到的冰雹直径为 2~60 mm。平均正地闪百分比及正地闪百分比概率密度与冰雹尺度之间的关系见图 7。图 7(a)为平均正地闪在总地闪中所占的百分比与冰雹尺度之间的关系,图中的正地闪百分比均是 5 个以上的“地闪—冰雹”雷暴过程样本的平均值。由图 7(a)可知,在冰雹直径 3~10 mm 的区间内,平均正地闪百分比与冰雹直径呈正比;当冰雹直径增加至 15 mm 时,正地闪百分比略有所减小,其值则降为 11.62%;而冰雹直径增加为 22 mm 时,平均正地闪百分比达到最大,其值为 30%;当冰雹的直径继续增加时,正地闪百分比呈下降趋势。

图 7(b)则为正地闪百分比概率密度与冰雹尺度之间的关系。由图 7(b)可知,在该研究区域内,正地闪百分比与冰雹的直径主要集中在小于 40%和 35 mm 的范围内,在此范围之外概率密度大为减小。当冰雹的直径为 10 mm 时,对应的平均正地闪百分

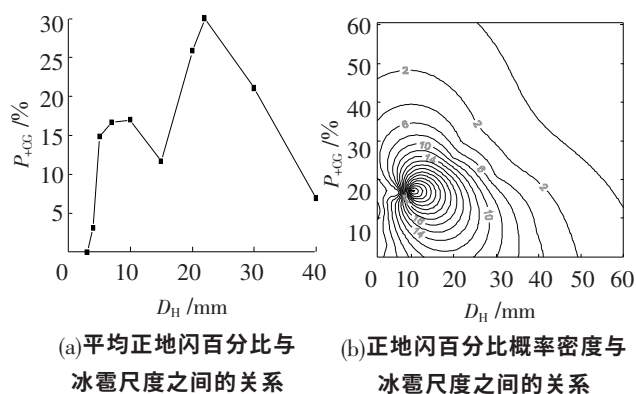


图 7 平均正地闪百分比及正地闪百分比概率密度与冰雹尺度之间的关系

Fig.7 Mean percentage of positive CG lightning and probability density of the percentage of positive CG lightning as functions of hail sizes

比为 16.98%,其概率密度最大,超过 3%;而最大的平均正地闪百分比 30%(对应的冰雹直径为 22 mm),其概率密度仅为 6%。

3 结论

利用 2005-2008 年的地闪监测资料,对地貌类型复杂的四川及其周边临近区域的地闪特征分析得到以下主要结论。

1)研究区域内地闪平均密度的分布与其地貌特征有着较为密切的关联性,地闪密度在“川西高原—四川盆地—南部丘陵”依次形成由少到多逐渐增加的分布格局。

2)总地闪与正地闪的分布特征有着明显的差别。年平均地闪密度分布最高的区域主要位于中国地貌第 1 阶梯青藏高原边缘龙门山脉以东的四川盆地及其以东区域和攀枝花地区,其最大值超过了 1 000 次/格点。年平均正地闪密度最大的区域主要位于甘孜州南部的稻城县,其值也超过了 50 次/格点。

3)总地闪密度的分布以夏季为主,其中夏季的最大值是春、秋季的 2 倍;在地闪发生的主要季节(除去冬季),春、夏和秋季总地闪频数随纬度变化的最大值出现在北纬 30°附近,这与 Hadley 与 Ferrel 环流在北纬 30°附近形成的下沉气流有关。

4)各年逐月分布的负地闪,以 7 月分布的为最多;而正地闪的分布特征与负地闪相比,存在着明显的差异。各年逐月的正地闪占总地闪的百分率分布基本呈“V”型

5)在川西高原以东的区域在日出之前及日落之后,各有一个平均地闪频数的峰值出现;川西高原区域只有在午后出现一个平均地闪频数的峰值。

6)冰雹尺度与地闪均可界定雷暴的危害强度,在冰雹直径 3~10 mm 的区间内,平均正地闪百分比与冰雹直径呈正比;冰雹直径为 22 mm 时,平均正

地闪百分比达到最大的30%。当冰雹直径为10 mm时,对应的平均正地闪百分比为16.98%,概率密度最大,其值超过37%。

参考文献:

- [1] RUST W D, MacGORMAN D R, ARNOLD R T. Positive cloud-to-ground lightning flashes in severe storms [J]. Geophysical Research Letters, 1981(8): 791-794.
- [2] TAYLOR R W L, MacGORMAN D R, ARNOLD R T. Research on electrical properties of severe thunderstorms in the great plains [J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 1981, 62(2): 1286-1293.
- [3] CAREY L D, RUTLEDGE S A, PETERSEN W A. The relationship between severe storm reports and cloud-to-ground lightning polarity in the contiguous united states from 1989 to 1998 [J]. Monthly Weather Review, 2003, 131(4): 1211-1228.
- [4] LANG T J, RUTLEDGE S A. Relationships between convective storm kinematics, precipitation and lightning [J]. Monthly Weather Review. 2002, 130(6): 2492-2506.
- [5] ZAJAC B A, RUTLEDGE S A. Cloud-to-ground lightning activity in the contiguous united states from 1995 to 1999 [J]. Monthly Weather Review, 2001, 129 (3): 999-1019.
- [6] 冯桂力, 郝秀书, 周筠珺. 一次中尺度对流系统的闪电演变特征[J]. 高原气象, 2006, 25(2): 220-228.
FENG Gui-li, QIE Xiu-shu, ZHOU Yun-jun. A case study on characteristics of lightning activity in a mesoscale convective system [J]. Plateau Meteorology, 2006, 25 (2): 220-228.
- [7] 郝秀书, 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(3): 743-750.
QIE Xiu-shu, ZHOU Yun-jun, YUAN Tie. Global lightning activities and their regional differences observed from the satellite [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2003, 46(3): 743-750.
- [8] 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.
ZHOU Yun-jun, DU Ke-lei, SUN Ling. Lightning characteristics over the physiognomy transition region in the middle part of China [J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(7): 1347-1352.
- [9] 周筠珺, 孙凌, 杨静, 等. 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, 35(6): 1309-1315.
ZHOU Yun-jun, SUN Ling, YANG Jing, et al. Characteristics of lightning activities over southwest and its circumjacent areas in China [J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(6): 1309-1315.
- [10] WILLIAMS E R. Global circuit response to seasonal variations in global surface air temperature [J]. Monthly Weather Review, 1994, 122(4): 1917-1929.
- [11] WILLIAMS E R. Lightning and climate: A review [J]. Atmospheric Research, 2005, 76(1-4): 272-287.
- [12] 罗成德, 罗利群. 四川的自然灾害与可持续发展 [J]. 地域研究与开发, 2003, 22(2): 70-74.
LUO Cheng-de, LUO Li-qu. A study on disaster and sustainable development of sichuan province [J]. Areal Research and Development, 2003, 22(2): 70-74.
- [13] 刘富明. 近10多年来四川气候变化及其预测研究的评述 [J]. 四川气象, 1996, 16(3): 25-28.
LIU Fu-ming. Comments on climate change and its foreshadow of Sichuan in recent 10 years [J]. Journal of Sichuan Meteorology, 1996, 16(3): 25-28.
- [14] 矫梅燕, 李川, 李延香. 一次川东大暴雨过程的中尺度分析 [J]. 应用气象学报, 2005, 16(5): 699-704.
JIAO Mei-yan, LI Chuan, LI Yan-xiang. Mesoscale analyses of a Sichuan heavy rainfall [J]. Quarterly Journal of Applied Meteorology, 2005, 16(5): 699-704.
- [15] 林建, 曲晓波. 中国雷电事件的时空分布特征 [J]. 气象, 2008, 34(11): 22-30.
LIN Jian, QU Xiao-bo. Spatial and temporal characteristics of lightning events in China [J]. Meteorology, 2008, 34 (11): 22-30.
- [16] 刘方兴, 李学勇, 曹志东, 等. 山东雷电监测定位系统数据分析与应用 [J]. 山东电力技术, 1997, 96(4): 128.
LIU Fang-xing, LI Xue-yong, CAO Zhi-dong, et al. The application & analysis of data of lightning location system in Shandong province [J]. Shandong Electric Power, 1997, 96(4): 128.
- [17] 冯桂力, 郝秀书, 袁铁, 等. 一次冷涡天气系统中雷暴过程的地闪特征分析 [J]. 气象学报, 2006, 64(2): 211-220.
FENG Gui-li, QIE Qiu-shu, YUAN Tie, et al. A case study of cloud-to-ground lightning activities in hailstorms under cold eddy synoptic situation [J]. Acta Meteorologica Sinica, 2006, 64(2): 211-220.
- [18] 盛裴轩, 毛节泰, 李建国, 等. 大气物理学 [M]. 北京: 北京大学出版社, 2003.
SHENG Pei-xuan, MAO Jie-tai, LI Jian-guo. Atmospheric physics [M]. Beijing: Peking University Press, 2003: 400-412.
- [19] 郝秀书, 余晔, 王怀斌, 等. 中国内陆高原闪电特征的统计分析 [J]. 高原气象, 2001, 20(4): 395-400.
QIE Xiu-shu, YU Ye, WANG Huai-bin, et al. Analyses on some features of ground flashes in Chinese inland plateau [J]. Plateau Meteorology, 2001, 20(4): 395-400.
- [20] 周筠珺, 张健龙, 孙凌. 京、津、冀地区闪电特征的统计分析 [J]. 灾害学, 2009, 24(1): 101-105.
Zhou Yun-jun, Zhang Jian-long, Sun Ling. Statistic analysis on cloud-to-ground lightning characteristics over beijing, tianjin and hebei province [J]. Journal of Catastrophology, 2009, 24(1): 101-105.
- [21] SÁTORI G, WILLIAMS E, LEMPERGER I. Variability of global lightning activity on the ENSO time scale [J]. Atmospheric Research, 2009, 91(4): 500-507.

刘畅(1985—),男,硕士研究生,主要研究方向为大气电学。