

文章编号 1004-924X(2018)01-0218-12

卫星与地基闪电探测资料 在闪电活动研究中的综合应用

惠雯^{1,2}, 黄富祥^{1*}, 郭强¹

(1. 国家卫星气象中心, 北京 100081;

2. 高原大气与环境四川省重点实验室, 四川 成都 610225)

摘要: 利用闪电探测资料研究闪电放电特性及其活动特征, 对于雷电灾害的监测和预警具有重要意义。卫星闪电探测不受下垫面条件限制, 可观测覆盖区域内的总闪电, 但无法区分云闪与地闪, 地基闪电探测以定位地闪为主, 且二者探测原理不同。本文分析了卫星与地基闪电探测在观测目标、定位精度和探测率等方面的差异; 在此基础上, 利用卫星闪电成像仪 TRMM LIS 与我国国家雷电监测网资料, 提出一种结合星地同步闪电观测数据的闪电活动分析方法, 该方法对两种资料中时空特性较为相近的探测单元进行匹配处理, 通过聚类算法得到闪电信息; 利用该方法分析了我国西南地区 2008~2014 年的闪电分布特征。结果表明: 该方法可有效获得观测区域的闪电信息, 且从气候与地形因素等方面可对分析结果给予解释; 下一步结合静止卫星闪电探测资料, 可从数据匹配误差上获得改进, 同时可将多源闪电观测资料结合的方法扩展到更多应用。

关键词: 闪电探测; 闪电成像仪; 静止卫星; 闪电密度

中图分类号: P413 文献标识码: A doi:10.3788/OPE.20182601.0218

Combined application of lightning detection data from satellite and ground-based observations

HUI Wen^{1,2}, HUANG Fu-xiang^{1*}, GUO Qiang¹

(1. National Satellite Meteorological Center, Beijing 100081, China;

2. Plateau Atmosphere and Environment Key Laboratory
of Sichuan Province, Chengdu 610225, China)

* Corresponding author, E-mail: huangfx@cma.cn

Abstract: Research on the lightning activities by taking advantage of the lightning detection data from satellite and ground-based observations is of great importance for lightning monitoring and early warning for thunderstorm. A satellite-based lightning imager can detect lightning signals over both ocean and land areas, and provide total lightning data including intracloud and cloud-to-ground lightning. However, a ground-based lightning location system usually gets the cloud-to-ground lightning. The two ways detect optical and radiometric emissions from lightning respectively. Firstly, the differences between satellite and ground-based lightning detection were analyzed in the aspects of

收稿日期: 2017-06-15; 修订日期: 2017-08-11.

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (No. 41275035); 高原大气与环境四川省重点实验室开放课题资助项目 (No. PAEKL-2016-C5)

the observed objective, location accuracy, and detection efficiency. Secondly, based on the data of TRMM LIS and the ground-based lightning detection network over China, a method for combination of satellite and ground-based lightning detection data was proposed. More specifically, by matching the similar units from both kinds of data and clustering the lightning groups, the combined lightning flashes could be extracted. Finally, the method was used in analyzing the lightning activities in southwest China from 2008 to 2014. The results show that the proposed method is feasible from the perspective of climatic and topography factors. In future, by integrating the data of geostationary satellite-based lightning imager, the matching error can be decreased, and the improved method will be applied to more solutions.

Key words: lightning detection; lightning imager; geostationary satellite; lightning density

1 引 言

闪电是一种大气放电现象,闪电活动往往伴随着暴雨、冰雹、狂风等自然灾害^[1-2],据不完全统计,我国每年因闪电造成的经济损失可达数十亿元^[3],利用闪电探测技术研究闪电放电特性及其活动特征,对于雷电灾害的监测和预警具有重要意义。闪电探测技术发展至今已有几十年的历史,地基闪电监测网通过电磁脉冲定位闪电,可连续、实时地记录和分析波形特征点的到达时间和位置^[4]。1980 年代,美国、法国、中国等开始研发比较成熟的地基闪电定位系统^[5-10]。目前,地基闪电监测网已覆盖很大范围的陆地表面,但受下垫面条件等因素的限制,很难扩展到更大区域(如海洋和热带地区)并获得更高精度^[11]。卫星闪电探测研究始于 1960 年代^[12],直到 1980 年代,美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)利用 U-2 高空飞机成功进行闪电观测试验,获得闪电特征光谱,才确立基于光学成像的卫星闪电探测技术^[13-14]。1995 年和 1997 年,美国先后研制并星载了光学瞬态探测器(Optical Transient Detector, OTD)^[15-16]和闪电成像仪(Lightning Imaging Sensor, LIS)^[17],OTD 和 LIS 搭载于低轨道卫星,受观测平台制约,对任一地点的注视时间十分有限,只能记录该地点全部闪电事件中的一小部分,提供区域平均意义上的闪电分布信息。于是,基于地球静止轨道的闪电探测技术和框架逐渐形成^[18]。静止卫星闪电成像仪可连续、实时监测闪电活动,实现对强对流天气系统的追踪和预警^[19-21],被认为是卫星闪电探测的最有效手

段^[22]。美国、中国和欧盟一直致力于对静止卫星闪电成像仪的研究^[22-27],其中,中国风云四号(FY-4)LMI(Lightning Mapping Imager)和美国的 GOES-R GLM(Geostationary Lightning Mapper)已于 2016 年底成功发射。

卫星与地基闪电探测技术的发展为闪电活动研究积累了大量观测资料。利用 OTD 和美国国家雷电监测网(National Lightning Detection Network, NLDN)的资料, Boccippio 等^[28]探讨了云闪/地闪比率与地形、纬度和海拔等因素的关系;王宇等^[29]根据北京闪电综合探测网(Beijing Lightning NETwork, BLNET)的定位结果观察了雷暴的移动情况;王娟等^[30]统计了中国国家雷电监测网给出的地闪活动规律;利用 LIS 资料, Christian^[31]、郅秀书等^[32]和朱润鹏等^[33]分析了全球闪电分布情况, Boccippio 等^[34]和 Albrecht 等^[11]发现闪电频发区域主要集中在海岸、山地、中尺度气旋多发地及热带辐合区(Intertropical Convergence Zone, ITCZ), Beirle 等^[35]根据闪电属性信息探讨了闪电强度的分布特点,袁铁等^[36]和马明等^[37]研究了闪电活动与降水及其它气象活动的关系。闪电观测资料是深入了解闪电特性的依据,尽管静止卫星闪电成像仪已可以连续、实时地提供闪电信息,然而,卫星探测的是包括云闪、云间闪和地闪在内的总闪电,且对云闪更加敏感,地基闪电监测网则以定位地闪为主,且能够测量闪电极性、强度等信息,可与卫星资料互为补充。但值得注意的是,由于卫星与地基探测闪电的原理和方法不同,使得二者在观测目标、定位精度和探测率等方面存在较大差异,如何根据两种技术的特点,更加有效地利用其观测资料将是本文的研究重点。

本文首先通过对国内外文献的详细调研,重点从探测原理和数据特点两方面对卫星与地基闪电探测技术的差异进行说明;进而针对这些差异,梳理与星-地闪电资料结合应用相关的方法;在此基础上,利用低轨道卫星闪电成像仪 LIS 与我国国家雷电监测网数据,提出一种结合卫星与地基闪电数据的闪电活动分析方法,并以我国西南地区为例,对该方法进行试验,为将来进一步结合静止卫星闪电观测资料提供参考。

2 探测原理及数据特点

2.1 地基闪电探测技术

闪电放电辐射出频率很宽的电磁脉冲,频率范围从极低频到超高频(VLF~UHF),其中以 VLF/LF 辐射为最强^[38]。低频闪电电磁脉冲辐射主要由地闪产生,云闪产生的电磁脉冲辐射主要分布在 VHF 频段^[8]。闪电回击(Stroke)产生的电磁波以地波和天波的形式发散,可在距离闪电发生处上千公里外的地点观测得到,因此,地基闪电定位系统会通过几个测站同时测量闪电回击辐射的电磁场来确定闪电源的位置^[3, 5]。多站闪电定位方法主要有磁定向法(Magnetic Direction Finder, MDF)、时差法(Time of Arrival, TOA)和时差测向混合法(IMPproved Accuracy from the Combination of MDF and TOA Technology, IMPACT)^[6]。

2.2 卫星闪电探测技术

卫星闪电成像仪观测雷暴云中闪电发出的强烈光脉冲,利用闪电信号与背景信号在时间、空间和光谱特性方面的差异,通过 CCD 面阵探测器,综合利用光谱滤波^[39-41]、空间滤波^[13]、时间滤波^[42]和背景减光^[17, 43-44]等技术获取闪电信号。该过程会将自然界的完整闪电人为分割到不同帧中,或被分割至若干相邻像元,需通过地面系统,采用不同层级数据对闪电信息进行重建。卫星闪电成像仪的基本探测单元是闪电事件(Event),在闪电事件的基础上,可通过聚类依次生成闪电组(Group)、闪电(Flash)和闪电区域(Area)等数据,其中 Flash 具有时间和空间上的延展性,可看作传统意义上的一次闪电。

2.3 卫星与地基闪电探测资料的差异

卫星与地基探测闪电的技术特点决定了二者获取的闪电资料存在一定差异:

(1)卫星闪电成像仪记录闪电事件,而地基闪电监测网定位的是闪电回击,二者观测到的是闪电的不同表现形式;

(2)卫星闪电成像仪在云顶观测闪电,无法区分云闪与地闪,且对云闪更加敏感,而地基闪电监测网以探测地闪为主;

(3)即使对同一个闪电目标,卫星与地基观测的时间和定位上存在误差,也会导致观测结果不完全一致。

此外,如果是低轨道卫星闪电成像仪,受卫星平台制约,只有在其经过的位置恰好有闪电发生,才有可能探测到,而地基闪电监测网是能够连续、实时地记录闪电的。

3 卫星与地基闪电探测资料结合的应用现状

早在低轨道卫星闪电成像仪 OTD 与 LIS 发射之初, Boccippio 等^[45]、Ushio 等^[46]和 Thomas 等^[47]就关注过卫星与地基闪电探测数据的相关性与差异。因此,国内外学者在应用闪电资料时,对不同来源数据的匹配处理有过一些考虑。Thompson 等^[48]对地基闪电观测网 WWLLN (World Wide Lightning Location Network)和 ENTLN (Earth Networks Total Lightning Network)与 LIS 数据进行对比,将时间间隔不大于 0.4 s、空间间隔不大于 0.15 经/纬度的 WWLLN/ENTLN stroke 看作一个 LIS group,并定义了 CP(Coincidence Percent)指标对 18 个月内在每 $1^\circ \times 1^\circ$ 经纬度网格内地基数据与 LIS 数据的一致性进行度量; Sloop 等^[49]用 ENTLN stroke 转换而成的 flash 与 LIS flash 进行匹配,条件为 ENTLN flash 在 0.5 经/纬度范围内需发生在两次 LIS flash 之间,且 LIS flash 与 ENTLN flash 的时空间隔为 100 ms/20 km; Liu 等^[50]和 Finke 等^[51]认为时间间隔不超过 700 ms、空间间隔不超过 10 km 的地基 stroke 可聚类为一个闪电 flash; Boccippio 等^[28]和 马明等^[52]根据 OTD/LIS 和 NLDN 数据,将空间半径 10 km、两次地基 stroke 间隔 500 ms 且一次 flash 时间不超过 1 s 等作为 stroke 聚类为 flash 的条件;而 Rudlosky 等^[53]则经过多次试验,提出时空阈值的改变并不

会对 LIS 与地基数据匹配的结果产生太大影响。

4 结合卫星与地基闪电资料的闪电活动分析方法

在前人研究的基础上,本文利用低轨道卫星闪电成像仪 LIS 资料,以及我国国家雷电监测网的地基闪电观测资料,尝试通过卫星与地基闪电数据的匹配,提出一种结合卫星与地基闪电资料的闪电活动分析方法,并根据分析结果,从气候和地形因素等方面给予初步解释。

4.1 研究数据和区域

LIS 资料来自美国全球水文资源中心(Global Hydrology Resource Center, GHRC)。LIS 采用 128×128 pixel CCD 面阵探测器,星下点空间分辨率为 $3 \sim 6$ km,观测区域为 $38^\circ\text{N} \sim 38^\circ\text{S}$,对任一地点的驻留时间约为 90 s,轨道周期为 92.5 min,每日约 16 轨,对同一地点完成一个完整的日循环观测需要 49 d。LIS 观测数据中给出了闪电 event、group、flash 和 area 的发生时间、持续时间、辐射中心位置、辐射强度和覆盖范围等参数,以及卫星运行过程中的位置和姿态等信息。

我国国家雷电监测网建于 2007 年,是覆盖我国范围较为完备的地基闪电探测系统。单站辐射半径约 300 km,定位精度小于 500 m,采用由中国科学院空间科学与应用研究中心研制的 ADTD 闪电定位系统记录地闪回击数据,测量参数主要包括地闪回击的发生时间、位置、极性、强度和陡度等。

另外,在分析地形因素的影响时,还使用了 SRTM(Shuttle Radar Topography Mission)提供的 90 m 分辨率数字高程资料,参考水准面为 WGS84 大地水准面模型,按 $5^\circ \times 5^\circ$ 组织数据,每个数据文件包含 $6\,001 \times 6\,001$ 个采样点。

研究区域为我国西南地区,经纬度范围为 $22 \sim 32^\circ\text{N}$, $99 \sim 109^\circ\text{E}$ 。西南地区地形复杂,属闪电多发区,LIS 与国家雷电监测网的观测均可覆盖该地区。研究时间为 2008 年至 2014 年。

4.2 数据处理方法

首先,选取 LIS 与地基监测网的同步观测数据。根据 LIS 给出的卫星运行轨迹信息,从地基 stroke 数据中,提取与 LIS 经过西南地区的时间和位置重合的闪电 stroke。

其次,对于时空特性较为相似的 LIS group 与地基 stroke,有以下定义。

(1)资料一致性:在特定时间段内,能够至少与一个地基 stroke 重合的 LIS group 占该时间段内 LIS group 总数的比例。

按照经纬度,将 LIS group 与地基 stroke 进行匹配,计算不同经纬度匹配参数所对应的两种资料一致性与时间差的关系,如图 1 所示。再按照时间匹配,计算不同时间匹配参数所对应两种资料一致性与经纬度差的关系,如图 2 所示。从图 1 和图 2(彩图见期刊电子版)可以看出,当 LIS group 与地基 stroke 的时间差达到 60 s、经纬度差达到 0.6° 时,资料一致性趋于稳定,约为 60%。

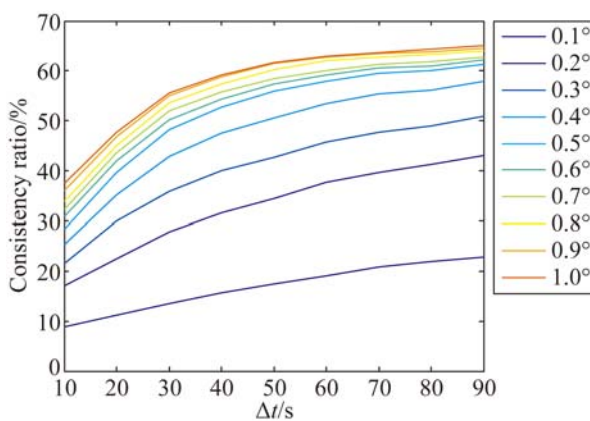


图 1 资料一致性与时间差的关系

Fig. 1 Relationship between data consistency and time difference

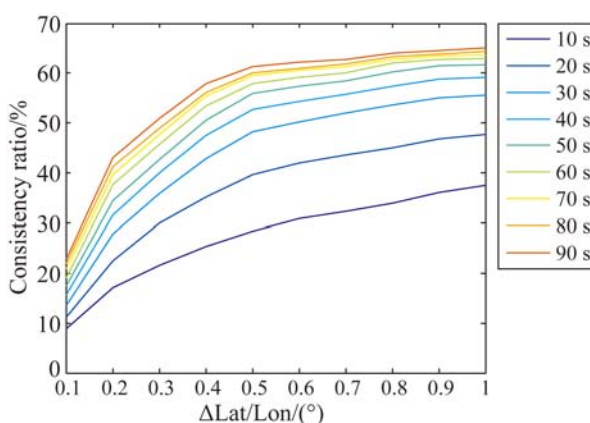


图 2 资料一致性与经纬度差的关系

Fig. 2 Relationship between data consistency and difference of latitude and longitude

资料一致性提高的同时,必然会出现资料冗余,对资料冗余度的定义如下。

(2)资料冗余度:在特定时间段内,与多于一个地基 stroke 重合的 LIS group 占该时间段内 LIS group 总数的比例。

图 3 和图 4(彩图见期刊电子版)分别给出不同经纬度匹配参数所对应的资料冗余度与时间差的关系,以及不同时间匹配参数所对应资料冗余度与经纬度差的关系。兼顾资料一致性的参数调整结果,当 LIS group 与地基 stroke 的时间差为 60 s、经纬度差为 0.6° 时,资料冗余度约为 40%,尚在可接受范围。

根据上述统计结果,设置时空匹配窗口大小,将地基监测网获取的西南地区全部闪电 stroke 转换为 group,继而与 LIS group 合并,利用基于动态类中心调整和 Elkan 三角判定思想的 K-means 聚类算法^[61],将闪电 group 聚类为 flash,以此实现不同类型闪电数据的结合。

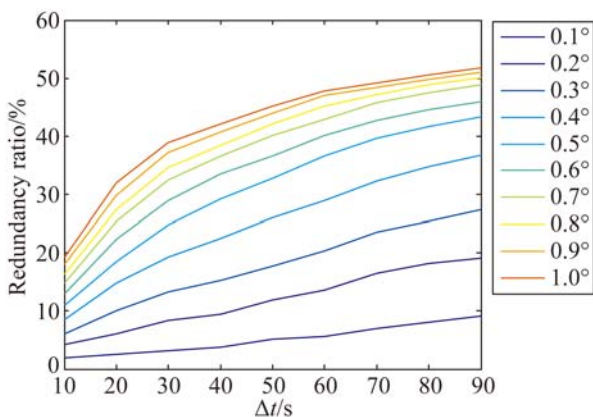


图 3 资料冗余度与时间差的关系

Fig. 3 Relationship between data redundancy and time difference

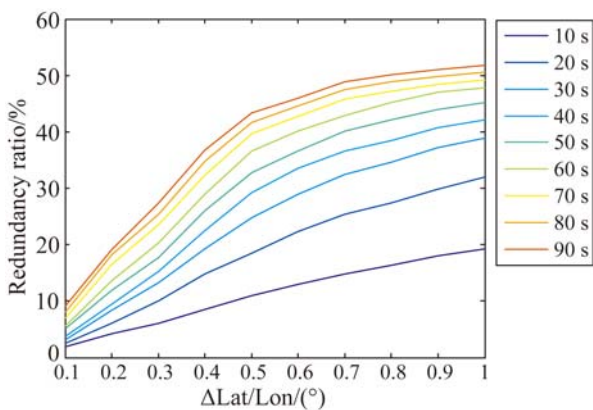


图 4 资料冗余度与经纬度差的关系

Fig. 4 Relationship between data redundancy and difference of latitude and longitude

4.3 结果分析

利用上述方法处理 2008~2014 年 LIS 和国家雷电监测网在西南地区的闪电观测数据,对该地区闪电发生次数的年际、月际和每日各时段变化,以及闪电密度分布进行分析,其中,闪电密度定义为每年每平方公里发生的闪电次数。

4.3.1 闪电活动的时间分布特征

图 5 为各年白天(北京时间 08 时至 20 时)、夜间(北京时间 20 时至 8 时)及全天闪电发生次数的年际变化特征。图中显示,7 年间西南地区闪电数量有一定波动,2008~2010 年呈上升趋势,平均每年增长 11.01%,2010 年达到一个峰值,2011 年又恢复至与 2008 年相当,2011~2013 年变化不大,但到 2014 年,闪电数量再次达到峰值,相比数量最少的 2011 年,增长近 40%。相关研究指出^[54],在给定区域,一次地闪风暴产生的地闪数量可占全年的 25%,这说明闪电数量在年际之间是会发生较大变化的。进一步地,对每年的昼夜闪电数量进行对比,可以看出,西南地区的昼夜闪电发生次数接近,且与年际变化趋势基本相同,白天发生的闪电占全天的 48.90%,夜晚闪电占 51.10%,其中昼夜差异最小的是 2010 年,夜间闪电数量仅比白天多 0.18%,2008 年差异略大,主要与这一年 LIS 获取的闪电数量与地基监测网记录的闪电数量差相比其他几年要大有关系,而卫星闪电成像仪在夜间的闪电探测能力要优于白天。

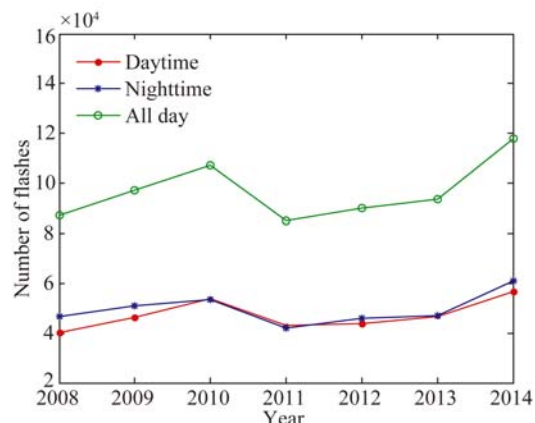


图 5 2008~2014 年西南地区白天、夜间及全天 Flash 数量的年际变化

Fig. 5 Interannual variation of number of lightning flashes within daytime, nighttime, and all day in southwest China from 2008 to 2014

图 6(彩图见期刊电子版)为各年闪电发生次数的逐月变化。图中呈现的 7 年间 Flash 数量在各月的变化是比较相似的,对每年数据与其他 6 年的均值进行相关性分析,得到相关系数分别为 0.92、0.97、0.96、0.92、0.97、0.96、0.96,说明各年数据间的相关性良好。对 7 年数据进行平均(图 6 中的黑色虚线),可以看出,西南地区在一年中发生的闪电呈单峰值分布特征,高发期开始于 4 月,延续至 8 月,这段时间的平均闪电数量接近全年的 90%,其中,最大值一般出现在 6 至 8 月,9 月开始,闪电数量迅速减少,从 11 月至次年 2 月,平均闪电数量仅为全年的 3.18%。闪电发生次数的月际变化说明,西南地区闪电的季节变化特征是非常明显的,闪电最为活跃的时期集中在春季和夏季,夏季闪电最多,而秋冬季,闪电活动进入沉寂期,特别是冬季,闪电几乎鲜有发生,这一现象是与副热带高压的季节性移动以及东亚夏季季风影响下的对流性天气密切相关的。每年 4 至 5 月,影响西南地区的西南季风形成,对流云系增多;6 月中旬,西太平洋副热带高压北跳越过 20°N ,稳定在 $20\sim 25^{\circ}\text{N}$ 之间,西南地区形成大范围阴雨天气,伴随着大量闪电活动^[55];7 月上、中旬,副热带高压再次北跳,徘徊在 $25\sim 30^{\circ}\text{N}$,触发四川盆地暴雨过程^[56],闪电密集发生;7 月末至 8 月初,副热带高压达到一年中最北位置,随后势力减弱,9 月开始,寒冷干燥的冬季风建立,闪电大幅减少。

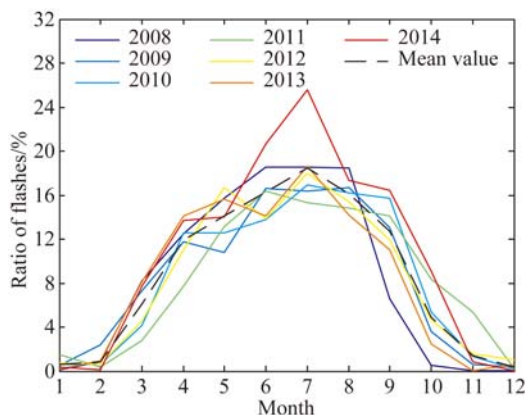


图 6 2008~2014 年西南地区 Flash 数量的月际变化
Fig. 6 Inter-monthly variation of number of lightning flashes in southwest China from 2008 to 2014

图 7 给出平均每日各时段的闪电数量变化。无论是闪电高发季节(4~8 月),还是闪电低发季节(9 月~次年 3 月),闪电活动的日变化特征都比较明显,且变化趋势相近,呈单峰值分布,主要

集中在下午和夜间。每日午后,闪电数量迅速增加,14:00 至 24:00 活动较为频繁,占一天中闪电总量的 57.32%,其中 17:00 前后达到峰值,此时的数量接近最小值的 3 倍,晚间闪电的发生略有波动,凌晨过后逐渐减少,至上午 10:00 前后进入闪电活动的低谷时段。西南地区闪电的日变化特征与对流活动规律是对应的,对流活动一般在午后开始发展,傍晚时刻最强^[57],而午夜前后的闪电密集发生多与该地区的夜雷暴密切相关,受地形因素影响,四川盆地是我国著名的夜雨盆地,闪电活动大多发生在夜间^[30, 52]。

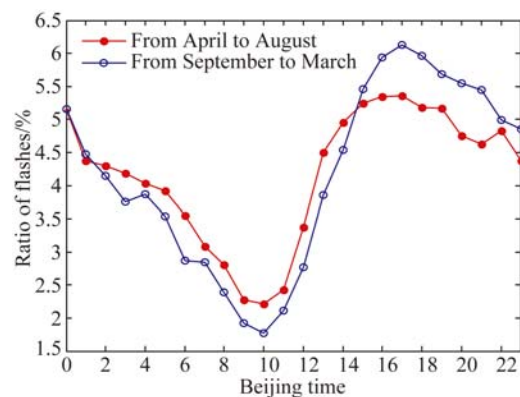


图 7 2008~2014 年西南地区 Flash 数量的日变化
Fig. 7 Daily variation of number of lightning flashes in southwest China from 2008 to 2014

4.3.2 闪电活动的空间分布特征

2008~2014 年西南地区闪电的空间分布如图 8 所示,平均闪电密度为 $4.31 (\text{fl} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1})$;闪电发生最活跃区域位于四川南部与云南的交界地区、云南南部边界地区,以及广西中南部,此处闪电密度最高超过 $30 (\text{fl} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1})$;其次是四川中部和东部、重庆北部和南部、云南东部、贵州西部,以及广西大部分地区,这一带的闪电密度约为 $10 (\text{fl} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1})$;四川和云南的西部闪电活动较少,很多地区的闪电密度甚至不到 $1 (\text{fl} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1})$ 。西南地区闪电的空间分布特征与该地区特殊的地形地貌相关,云贵高原东部受亚洲夏季风影响,且本身地势较高,易形成对流天气^[52];四川盆地受山脉的动力抬升作用,以及夜雨提供的大量水汽,是比较明显的闪电集中于夜间的区域,图 9 的昼夜闪电密度分布可以说明这一点,造成该现象的主要原因是盆地内潮湿、多云,白天云下气温不易升高,对流难以发展,而夜间云的逆辐射作用较大,地面附近被加热,因此

容易出现强对流活动^[30]；此外，西南地区西部受青藏高原和喜马拉雅山南麓阻挡，孟加拉湾输送的暖湿气流难以越过山脉，抑制了对流的发展，于是这里形成了比较明显的闪电分布低值区。

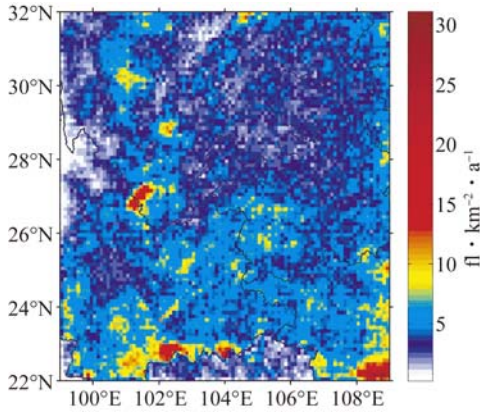
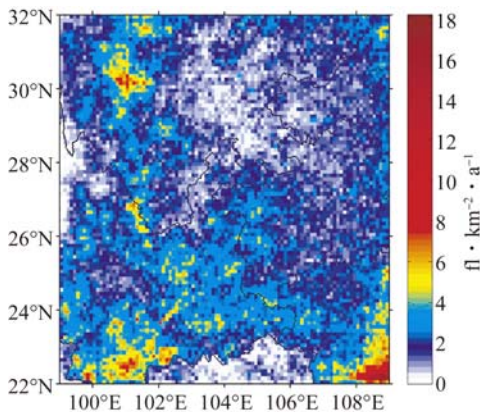
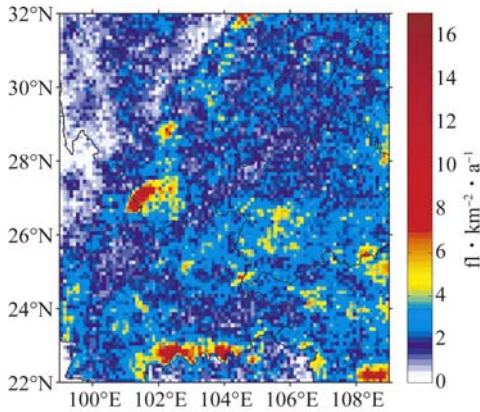


图 8 2008~2014 年西南地区闪电密度分布
Fig. 8 Spatial distribution of lightning activities in southwest China from 2008 to 2014



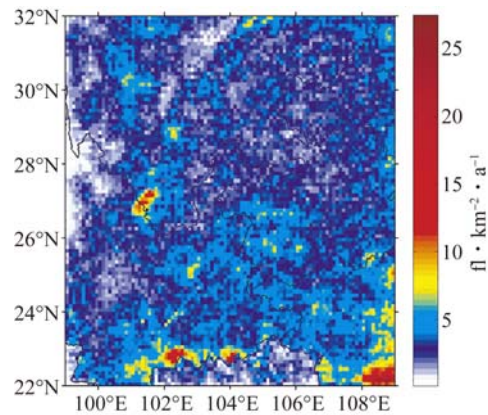
(a) 白天
(a) Daytime



(b) 夜间
(b) Nighttime

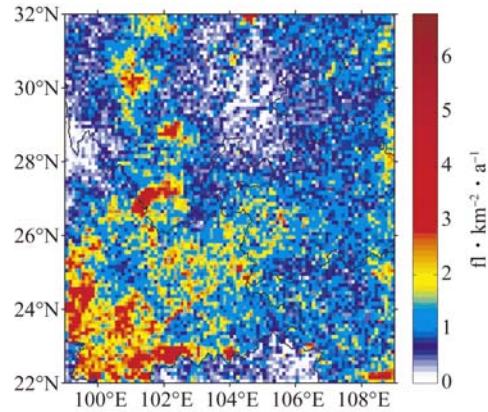
图 9 2008~2014 年西南地区昼夜闪电密度分布
Fig. 9 Spatial distribution of lightning activities within daytime and nighttime in southwest China from 2008 to 2014

根据前文所述西南地区闪电的季节分布特点，图 10 给出在闪电高发期(4~8 月)与低发期(9 月~次年 3 月)的闪电密度分布，图中显示，西南地区的不同区域在不同季节的闪电密度是有较大差异的。春夏季节的高值区主要分布于云贵高原和广西大部、云南南部等地，这一时期温度较高，西南季风的增强带来雷电天气；秋冬季节副热带高压南撤，水汽输送减弱，闪电总量明显减少，而四川盆地、四川南部和云南南部相对其他地区，仍属于闪电活跃区。



(a) 闪电高发期

(a) Lightning activities within high-incidence



(b) 闪电低发期

(b) Lightning activities within low-incidence

图 10 2008~2014 年西南地区闪电高发期与低发期闪电密度分布

Fig. 10 Spatial distribution of lightning activities within high-incidence and low-incidence season in southwest China from 2008 to 2014

4.3.3 海拔高度对闪电活动的影响

西南地区海拔高度跨度较大，考虑海拔高度对

闪电分布的影响^[33, 58],利用 SRTM DEM 数据,计算 2008~2014 年西南地区闪电 Flash 密度随海拔高度的变化,如图 11 所示。可以看出,闪电密度峰值分布于海拔 50~300 m,这一海拔高度范围主要对应于四川盆地和广西中南部,闪电密度最大值可达 $31.12 \text{ (fl} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1})$;在海拔 300~2 400 m,也存在一个比较明显的闪电数量增长,最大值位于海拔 1 800 m 附近,对应云南中东部和贵州西部等地,闪电密度接近 $12 \text{ (fl} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1})$;在海拔 2 400 m 以上,闪电密度呈现较大波动,海拔 3 000~4 000 m,即青藏高原东南边缘地区,闪电密度最大值约为最小值的 10 倍。

西南地区闪电密度随海拔高度的变化,也解释了闪电活动的空间分布特征。近地层的大气层结不稳定,有利于对流发展,四川盆地的地势分布为闪电发生创造了条件;而当海拔高度达到一定程度后,水汽变少,这时即使有对流,也难以产生雷暴,于是在海拔 300 m 附近闪电密度有所下降;海拔 1 000 km 以上,由于高原地形对气流的强迫抬升,对流活动再次发生;青藏高原东南边缘山地较多,地势起伏较大,闪电活动的变化既与山脉的抬升作用及高原上的热动力特征有关^[59],也与这一区域降水系统中不稳定的深对流活动有关^[60],因而闪电分布十分不均;更高海拔主要对应的是山峰,空气寒冷、干燥,不易形成对流,闪电密度相对较低,且变化不大。

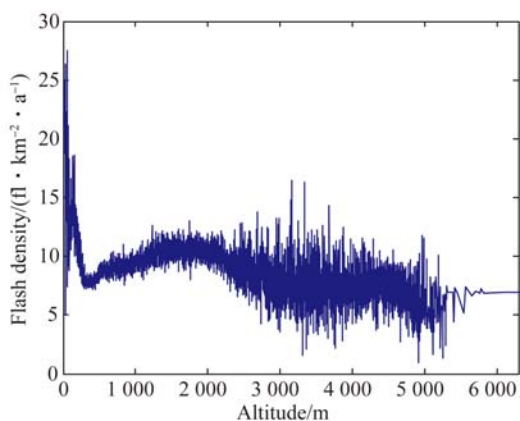


图 11 2008~2014 年西南地区不同海拔高度上的闪电活动
Fig. 11 Relationship between number of lightning flashes and altitude in southwest China from 2008 to 2014

5 结 论

本文梳理了卫星与地基闪电探测资料的主要差异及在实际应用中面临的问题,尝试提出了一种结合卫星与地基闪电资料的闪电活动分析方法,该方法对两种观测数据中时空特性较为相近的探测单元进行匹配处理,进而通过聚类算法得到闪电信息。以我国西南地区为例,对该方法进行试验,处理分析结果表明:

基于 LIS 与我国国家雷电监测网数据,本文提出的方法可以更有效地获得观测区域的闪电特征。低轨道卫星闪电成像仪因观测驻留时间有限,难以实现与地基闪电监测网的同步观测,本文通过选取与 LIS 轨迹重合的地基 stroke 来进行数据匹配,在时间和位置的选择上不可避免地会引入误差。未来利用静止卫星闪电探测数据,可直接与地基数据进行匹配处理,避免提取同步数据所引入的误差;更重要的是,静止卫星闪电成像仪可对观测区域的闪电活动进行连续、实时监测,将静止卫星闪电探测资料与地基闪电观测资料结合,可以获得更加完整、准确的闪电分布信息。本文选取时空特性较为相近的 LIS group 与地基 stroke 进行数据匹配,但二者是否最合适的数据匹配单元,在后续研究中还需进一步探讨。卫星探测总闪,而地基探测以地闪为主,利用这一特性,下一步还将考虑如何结合静止卫星与地基闪电观测资料提取云地闪比率(Z 值)。 Z 值是在雷暴物理过程分析和雷电监测预警中的一项重要指标^[28, 52],通过有效提取 Z 值,可对其分布与变化规律及其影响因素研究提供依据。

致谢 感谢美国全球水文资源中心(GHRC)提供的 LIS 资料,以及国际农业研究咨询小组(CGIAR)的空间信息协会(CGIAR-CSI)提供的 SRTM DEM 资料。

参考文献:

- [1] FINKE U, KREYER O. Detect and locate lightning events from geostationary satellite observations, report part I: Review of existing lightning location systems[R]. *Technical Report EUM/CO/02/1016/SAT*, 2002.
- [2] GOODMAN S J, BLAKESLEE R, KOSHAK W J, *et al.*. The geostationary lightning mapper (GLM) for GOES-R: A new operational capability to improve storm forecasts and warnings [C]. *Proc. AMS 6th Annual Symposium on Future National Operational Environmental Satellite Systems-NPOESS and GOES-R*, *American Meteorological Society*, 2010.
- [3] 王道洪, 郝秀书, 郭昌明. 雷电与人工引雷 [M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2000: 207-217.
WANG D H, QIE X SH, GUO CH M. *Lightning and Artificial Lead Mine* [M]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University Press, 2000: 207-217. (in Chinese)
- [4] 张广庶, 王彦辉, 郝秀书, 等. 基于时差法三维定位系统对闪电放电过程的观测研究 [J]. *中国科学: 地球科学*, 2010, 40(4): 523-534.
ZHANG G SH, WANG Y H, QIE X SH, *et al.*. Using lightning locating system based on time-of-arrival technique to study three-dimensional lightning discharge processes [J]. *Science China Earth Sciences*, 2010, 53(4): 591-602. (in Chinese)
- [5] CUMMINS K L, MURPHY M J, BARDO E A, *et al.*. A combined TOA/MDF technology upgrade of the U. S. national lightning detection network [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1998, 103(D8): 9035-9044.
- [6] BIAGI C J, CUMMINS K L, KEHOE K E, *et al.*. National Lightning Detection Network (NLDN) performance in southern Arizona, Texas, and Oklahoma in 2003-2004 [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2007, 112(D5): D05208.
- [7] DOWDEN R L, HOLZWORTH R H, RODGER C J, *et al.*. World-wide lightning location using VLF propagation in the Earth-ionosphere waveguide [J]. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 2008, 50(5): 40-60.
- [8] RICHARD P, DELANNOY A, LABAUNE G, *et al.*. Results of spatial and temporal characterization of the VHF-UHF radiation of lightning [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1986, 91(D1): 1248-1260.
- [9] BETZ H D, SCHMIDT K, LAROCHE P, *et al.*. LINET-An international lightning detection network in Europe [J]. *Atmospheric Research*, 2009, 91(2-4): 564-573.
- [10] QIEX SH, YAN M H, GUO CH M, *et al.*. Lightning data and study of thunderstorm nowcasting [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 1993, 7(2): 244-256.
- [11] ALBRECHT R I, GOODMAN S J, BUECHLER D E, *et al.*. Where are the lightning hotspots on Earth [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2016, 97(11): 2051-2068.
- [12] HERMAN J R, CARUSO J A, STONE R G. Radio Astronomy Explorer (RAE)-I. Observations of terrestrial radio noise [J]. *Planetary and Space Science*, 1973, 21(3): 443-461.
- [13] CHRISTIAN H J, FROST R L, GILLASPY P H, *et al.*. Observations of optical lightning emissions from above thunderstorms using U-2 aircraft [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1983, 64(2): 120-123.
- [14] BROOK M, RHODES C, VAUGHAN JR O H, *et al.*. Nighttime observations of thunderstorm electrical activity from a high altitude airplane [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* (1984-2012), 1985, 90(D4): 6111-6120.
- [15] CHRISTIAN H J, BLAKESLEE R J, BOCCIPPIO D J, *et al.*. Global frequency and distribution of lightning as observed from space by the Optical Transient Detector [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* (1984-2012), 2003, 108(D1): ACL 4-1-ACL 4-15.
- [16] BOCCIPPIO D J, KOSHAK W, BLAKESLEE R, *et al.*. The Optical Transient Detector (OTD): Instrument characteristics and cross-sensor validation [J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2000, 17(4): 441-458.
- [17] CHRISTIAN H J, BLAKESLEE R J, GOODMAN S J, *et al.*. Algorithm theoretical basis document (ATBD) for the lightning imaging sensor (LIS) [R]. Technical Report, Washington: NASA, 2000.
- [18] WOLFE W L, NAGLER M. Conceptual design of a spaceborne lightning sensor [J]. *SPIE*, 1980, 246: 22-23.
- [19] CHRISTIAN H J, BLAKESLEE R J, GOOD-

- MAN S J. The detection of lightning from geostationary orbit [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* (1984-2012), 1989, 94 (D11): 13329-13337.
- [20] 陈圣波, 杨莹, 崔腾飞. 静止卫星闪电探测中云影响研究 [J]. *地球物理学报*, 2012, 55(3): 797-803.
- CHEN SH B, YANG Y, CUI T F. Study of the cloud effect on lightning detection by geostationary satellite [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2012, 55(3): 797-803. (in Chinese)
- [21] CHAUZY S, COQUILLAT S, SOULA S. On the relevance of lightning imagery from geostationary satellite observation for operational meteorological applications [R]. Technical Report EUM/COL/LET/02/1562, 2002.
- [22] 黄富祥. FY-4 卫星闪电成像仪的使命和挑战 [J]. *气象科技*, 2007, 35(Z1): 35-42.
- HUANG F X. Lightning imaging sensor on FY-4 meteorological satellite: mission and challenge [J]. *Meteorological Science and Technology*, 2007, 35(Z1): 35-42. (in Chinese)
- [23] GOODMAN S J, BLAKESLEE R J, KOSHAK W. Geostationary Lightning Mapper for GOES-R and beyond [C]. *Proceedings of the 88th AMS Annual Meeting*, NASA, 2008.
- [24] GOODMAN S J, BLAKESLEE R J, KOSHAK W J, *et al.*. The GOES-R Geostationary Lightning Mapper (GLM) [J]. *Atmospheric Research*, 2013, 125-126: 34-49.
- [25] 周严, 田茂, 张青林, 等. 气象卫星闪电识别系统的设计与实现 [J]. *光学精密工程*, 2012, 20(7): 1587-1594.
- ZHOU Y, TIAN M, ZHANG Q L, *et al.*. Design and implementation of lightning identification system on meteorological satellite [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(7): 1587-1594. (in Chinese)
- [26] 鲍书龙, 唐绍凡, 李云飞, 等. 静止轨道瞬态点源多目标闪电信号实时探测技术 [J]. *红外与激光工程*, 2012, 41(9): 2390-2395.
- BAO SH L, TANG SH F, LI Y F, *et al.*. Real-time detection technology of instantaneous point-source multi-target lightning signal on the geostationary orbit [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(9): 2390-2395. (in Chinese)
- [27] GRANDELL J, FINKE U, STUHLMANN R. The EUMETSAT Meteosat Third Generation Lightning Imager (MTG-LI): Applications and product processing [C]. *Proceedings of the 9th EMS Annual Meeting*, EMS, 2009.
- [28] BOCCIPPIO D J, CUMMINS K L, CHRISTIAN H J, *et al.*. Combined satellite-and surface-based estimation of the intracloud cloud-to-ground lightning ratio over the continental United States [J]. *Monthly Weather Review*, 2001, 129(1): 108-122.
- [29] 王宇, 郝秀书, 王东方, 等. 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*, 2015, 39(3): 571-582.
- WANG Y, QIE X SH, WANG D F, *et al.*. Beijing Lightning NETwork (BLNET): Configuration and preliminary results of lightning location [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2015, 39(3): 571-582. (in Chinese)
- [30] 王娟, 湛芸. 2009—2012 年中国闪电分布特征分析 [J]. *气象*, 2015, 41(2): 160-170.
- WANG J, CHEN Y. Analysis of the 2009—2012 lightning distribution characteristics in China [J]. *Meteorological Monthly*, 2015, 41(2): 160-170. (in Chinese)
- [31] CHRISTIAN JR H J. Global lightning activity [C]. *Proceedings of the AMS Annual Meeting*, AMS, 2005.
- [32] 郝秀书, 周筠君, 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, 885.
- QIE X SH, ZHOU Y J, YUAN T. Global lightning activities and their regional differences observed from the satellite [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2003, 46(6): 743-750, 885. (in Chinese)
- [33] 朱润鹏, 袁铁, 李万莉, 等. 基于卫星观测资料的全球闪电活动特征研究 [J]. *气候与环境研究*, 2013, 18(5): 639-650.
- ZHU R P, YUAN T, LI W L, *et al.*. Characteristics of global lightning activities based on satellite observations [J]. *Climatic and Environmental Research*, 2013, 18(5): 639-650. (in Chinese)
- [34] BOCCIPPIO D J, KOSHAK W J, BLAKESLEE R J. Performance assessment of the optical transient detector and lightning imaging sensor. Part I: Predicted diurnal variability [J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2002, 19(9): 1318-1332.
- [35] BEIRLE S, KOSHAK W, BLAKESLEE R, *et al.*. Global patterns of lightning properties de-

- rived by OTD and LIS [J]. *Natural Hazards and Earth System Science*, 2014, 14 (10): 2715-2726.
- [36] 袁铁, 郝秀书. 基于 TRMM 卫星对一次华南飑线的闪电活动及其与降水结构的关系研究 [J]. *大气科学*, 2010, 34(1): 58-70.
- YUAN T, QIE X SH. TRMM-based study of lightning activity and its relationship with precipitation structure of a squall line in South China [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2010, 34(1): 58-70. (in Chinese)
- [37] 马明, 陶善昌, 祝宝友, 等. 全球闪电活动对气温变化的响应 [J]. *科学通报*, 2006, 50 (15): 1643-1647.
- MA M, TAO SH CH, ZHU B Y, *et al.*. Response of global lightning activity to air temperature variation [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2005, 50(22): 2640-2644. (in Chinese)
- [38] 郝秀书, 刘冬霞, 孙竹玲. 闪电气象学研究进展 [J]. *气象学报*, 2014, 72(5): 1054-1068.
- QIE X SH, LIU D X, SUN ZH L. Recent advances in research of lightning meteorology [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2014, 72(5): 1054-1068. (in Chinese)
- [39] GOODMAN S J, CHRISTIAN H J, RUST W D. A comparison of the optical pulse characteristics of intracloud and cloud-to-ground lightning as observed above clouds [J]. *Journal of Applied Meteorology*, 1988, 27(12): 1369-1381.
- [40] CHRISTIAN H J, GOODMAN S J. Optical observations of lightning from a high-altitude airplane [J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 1987, 4(4): 701-711.
- [41] 邵晶, 马冬梅, 聂真威. 光学成像系统光学波前的高精度测试 [J]. *光学精密工程*, 2011, 19(11): 2582-2588.
- SHAO J, MA D M, NIE ZH W. Accurate test of optical wave front for optical imaging system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(11): 2582-2588. (in Chinese)
- [42] BOCCIPPIO D J, DRISCOLL K, HALL J, *et al.*. LIS/OTD Software Guide[R]. Huntsville: Global Hydrology and Climate Center, 1998.
- [43] 韩心志. 静止卫星闪电测绘仪设计特点研讨 [J]. *红外*, 2011, 32(3): 4-9.
- HAN X ZH. Discussion on design features of lightning mapper for geostationary satellite [J]. *Infrared*, 2011, 32(3): 4-9. (in Chinese)
- [44] KALLURI S, GURKA J, RACE R. Improved observations of Earth and space weather from GOES-R [J]. *SPIE*, 2009, 7456: 74560M.
- [45] BOCCIPPIO D J, DRISCOLL K, KOSHAK W, *et al.*. Cross-sensor validation of the Optical Transient Detector (OTD) [J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 1998, 60 (7-9): 701-712.
- [46] USHIO T, HECKMAN S, DRISCOLL K, *et al.*. Cross-sensor comparison of the Lightning Imaging Sensor (LIS) [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2002, 23(13): 2703-2712.
- [47] THOMAS R J, KREHBIEL P R, RISON W, *et al.*. Comparison of ground-based 3-dimensional lightning mapping observations with satellite-based LIS observations in Oklahoma [J]. *Geophysical Research Letters*, 2000, 27(12): 1703-1706.
- [48] THOMPSON K B, BATEMAN M G, CAREY L D. A comparison of two ground-based lightning detection networks against the satellite-based Lightning Imaging Sensor (LIS) [J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2014, 31 (10): 2191-2205.
- [49] SLOOP C, LIU C, HECKMAN S. Analysis of earth networks total lightning detection efficiency versus LIS for 2011 through 2013 in North America [C]. *Proceedings of the 18th Conference on Integrated Observing and Assimilation Systems for the Atmosphere, Oceans, and Land Surface*, American Meteorological Society, 2014.
- [50] LIU CH L, HECKMAN S. The application of total lightning detection and cell tracking for severe weather prediction [C]. *Proceedings of the WMO Technical Conference on Instruments and Methods of Observation*, 2010.
- [51] FINKE U, KREYER O. Detect and locate lightning events from geostationary satellite observations, report part I: Review of existing lightning location systems [R]. *Technical Report EUM/CO/02/1016/SAT*, 2002.
- [52] 马明, 陶善昌, 祝宝友, 等. 卫星观测的中国及周边地区闪电密度的气候分布 [J]. *中国科学: D 辑*, 2004, 34(4): 298-306.
- MA M, TAO SH CH, ZHU B Y, *et al.*. Climatological distribution of lightning density observed by satellites in China and its circumjacent regions

- [J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2005, 48(2): 219-229. (in Chinese)
- [53] RUDLOSKY S D. Evaluating ground-based lightning detection networks using TRMM/LIS observations[C]. *Proceedings of the 7th Conference on the Meteorological Applications of Lightning Data*, American Meteorological Society, 2015.
- [54] RICHARD P, RICHARD O, RONALD H. The National Lightning Detection Network-severe storm observations[C]. *Proceedings of the 16th Conference on Severe Local Storms and Conference on Atmospheric Electricity*, 1990.
- [55] SOULA S, SEITY Y, FERL L, *et al.*. Cloud-to-ground lightning activity in hail-bearing storms [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2004, 109(D2): D02101.
- [56] 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 Y J, SUN L, YANG J, *et al.*. Characteristics of lightning activities over southwest and its circumjacent areas in China [J]. *High Voltage Engineering*, 2009, 35(6): 1309-1315. (in Chinese)
- [57] 王义耕, 刘浩, 王介君, 等. 卫星观测的西南地区闪电的时空分布 [J]. *大气科学学报*, 2010, 33(4): 489-495.
WANG Y G, LIU J, WANG J J, *et al.*. Temporal and spatial distributions of lightning activity in southwest China based on satellite observations [J]. *Transactions of Atmospheric Sciences*, 2010, 33(4): 489-495. (in Chinese)
- [58] 李家启, 申双和, 夏佰成, 等. 基于 ADTD 系统的闪电频次分布特征分析 [J]. *热带气象学报*, 2011, 27(5): 710-716.
LI J Q, SHEN SH H, XIA B CH, *et al.*. Analysis of lightning frequency distribution characteristics based on ADTD system [J]. *Journal of Tropical Meteorology*, 2011, 27(5): 710-716. (in Chinese)
- [59] 郑秀书, 袁铁, 谢毅然, 等. 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.
QIE X SH, YUAN T, XIE Y R, *et al.*. Spatial and temporal distribution of lightning activities over the Tibetan Plateau [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2004, 47(6): 997-1002. (in Chinese)
- [60] 齐鹏程, 郑栋, 张义军, 等. 青藏高原闪电和降水气候特征及时空对应关系 [J]. *应用气象学报*, 2016, 27(4): 488-497.
QI P CH, ZHENG D, ZHANG Y J, *et al.*. Climatological characteristics and spatio-temporal correspondence of lightning and precipitation over the Tibetan Plateau [J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2016, 27(4): 488-497. (in Chinese)
- [61] 张顺龙, 庠涛, 周浩. 针对多聚类中心大数据集的加速 K-means 聚类算法 [J]. *计算机应用研究*, 2016, 33(2): 413-416.
ZHANG SH L, KU T, ZHOU H. Accelerate K-means for multi-center clustering of big datasets [J]. *Application Research of Computers*, 2016, 33(2): 413-416. (in Chinese)

作者简介:



惠 雯(1982—),女,北京人,博士,高级工程师,2012 年于北京科技大学获得博士学位,主要从事卫星探测闪电和气象卫星信息处理等方面的研究。
E-mail: huiw@cma.cn



黄富祥(1967—),男,湖北蕲春人,博士后,研究员,2000 年于中国科学院获得博士学位,2002 年从中国科学院大气物理研究所博士后出站,主要从事卫星探测闪电和卫星遥感大气臭氧等方面的研究。E-mail: huangfx@cma.cn