

钱勇,施俊杰,王延慧,等.星地多源闪电资料在新疆地区的应用分析[J].沙漠与绿洲气象,2021,15(3):122-128.

doi: 10.12057/j.issn.1002-0799.2021.03.016

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



星地多源闪电资料在新疆地区的应用分析

钱勇¹,施俊杰²,王延慧¹,刘成武²,张小军³,张建涛⁴

(1.新疆气象灾害防御技术中心,新疆 乌鲁木齐 830002;2.新疆气象台,新疆 乌鲁木齐 830002;

3.国网新疆电力有限公司电力科学研究院,新疆 乌鲁木齐 830011;

4.中国气象局乌鲁木齐沙漠气象研究所,新疆 乌鲁木齐 830002)

摘要: 根据2019年7月20日新疆大部分区域出现局部强对流天气过程,利用ADTD、LLS、WWLLN、风云四号卫星闪电成像仪组产品LMIG、大气电场多源闪电观测资料,对比分析这5种资料在新疆地区的应用情况。结果表明:LLS地闪探测效率最高,LMIG和WWLLN地闪探测效率较低;ADTD、LLS、WWLLN三者定位结果在时间和空间上对应基本一致,仅探测效率有所差别。新疆地区部分LMIG数据存在时间和空间上的偏差,使用前需要利用相关资料进行数据检验。卫星全天空、实时监测,可以弥补新疆南部(简称南疆)地面观测站覆盖不到的区域,两者可互为补充。

关键词: 闪电定位系统;风云四号卫星;大气电场;探测效率

中图分类号: P427.32

文献标识码: A

文章编号: 1002-0799(2021)03-0122-07

闪电是指发生在不同极性电荷之间的长距离放电现象,所伴随的瞬时高温和强大的电磁辐射具有强大破坏力,是我国危害程度仅次于暴雨洪涝、气象地质灾害的第三大气象灾害^[1]。随着科学技术的发展,对闪电的监测技术也不断地丰富,所得闪电数据资料日趋丰富。根据传感器所处位置不同,闪电观测资料获取主要分为两种方式,基于闪电辐射电磁场传播理论的地面闪电探测技术和基于光学成像原理的卫星闪电探测技术,两者各有优势,互为补充^[2-4]。

我国地面闪电观测系统目前主要有中国气象局建设的国家级闪电定位系统(Active Directory Topology Diagrammer, ADTD)、美国的全球闪电定位网(World-Wide Lightning Location Network, WWLLN)、电力部门闪电定位系统(Lightning Location System, LLS)、各省气象局自行建设的甚低

频/甚高频三维闪电定位系统、大气电场监测系统。根据卫星所处轨道高度的不同,卫星闪电探测分为极轨卫星探测和静止卫星探测,前者以热带测雨卫星TRMM(Tropical Rainfall Measuring Mission)携带的LIS(Lightning Imaging Sensor)为代表^[5],后者以中国风云四号卫星(FY-4A)LMI(Lightning Mapping Imager)和美国的GOES-R GLM(Geostationary Lightning Mapper)为代表^[6-7]。极轨卫星闪电成像仪受观测平台制约,对任一地点的观测时间十分有限,只能记录该地点全部闪电事件中的小部分,提供区域平均意义上的闪电分布信息。静止卫星闪电成像仪可连续、实时监测闪电活动,可实现对强对流天气系统的追踪和预警,是卫星闪电探测新的发展方向,但目前全球都处于研究阶段^[8]。随着闪电探测技术不断发展与完善,积累了丰富的数据资料,国内外学者根据不同类型的数据资料,开展了雷电预警的研究、区域雷电活动特征的分析等。王娟等^[9]统计分析了中国国家闪电监测网数据资料,给出了地闪的活动规律。Shvets、郅秀书、朱润鹏等^[10-12]利用LIS资料分析了全球闪电分布情况。柴瑞等^[13]分析了地面大

收稿日期:2020-07-30;修回日期:2020-08-18

基金项目:新疆气象局面上项目(MS201808);中国沙漠气象科学研究基金(Sqj2019001)

作者简介:钱勇(1988—),男,工程师,主要从事雷电科学与防护技术研究。E-mail:gy880614@163.com

气电场数据在雷电预警中的应用。曾庆锋等^[14]对大气电场仪观测数据进行了质量控制和统一标定,并结合天气雷达、闪电定位仪和探空等多源数据资料,对地面大气电场的时空演变特征和电荷结构进行了分析,提出了利用单一来源观测资料及综合利用多源资料进行雷电临近预警,并评估了预警效果。

随着地面和卫星闪电监测技术的发展,积累了大量不同角度的数据资料,为闪电活动特征研究提供了基础。但目前的研究多是基于单一方式获取的闪电观测数据,孤立地分析某一区域雷电活动特征,其结果具有一定的局限性。不同地区由于闪电监测站点布站方式、站点密度、卫星观测角度的不同,闪电资料的可利用性也不同,因此分析某一区域闪电活动特征的前提是要弄清楚该区域各种闪电数据资料的可利用性,进而根据各种数据的特点,融合多源数据更加准确地进行分析。

新疆目前可利用的星地闪电观测资料有ADTD、LLS、WWLLN、LMIG、大气电场。新疆ADTD、LLS、大气电场仪分布如图1。本文主要通过上述多源闪电观测资料,根据2019年7月20日新疆大部分区域出现局部强对流天气过程,分析这5种资料在新疆地区的应用情况,为后续融合多源数据更加准确地分析新疆地区闪电特征、闪电资料并在雷电预警中的应用提供基础。

1 数据资料

ADTD 闪电监测系统由中国科学院空间科学与应用研究中心研制,利用到达时差法的原理对地闪进行定位,有效探测半径是150 km,可以给出闪电发生的时间、电流强度、极性、经纬度、陡度等相关参数^[15]。新疆目前已建设49个监测站点,但由于地域辽阔仍然不能实现有效的覆盖,除北疆部分区域外,新疆大部分区域探测效率不理想。

新疆电力部门闪电定位系统LLS于2012年7月建设完成,目前共建设54个闪电定位探测站,单站探测范围约为100 km,定位误差 ≤ 1 km。系统定位算法采用时差法、定向定位法和定向时差联合法对地闪定位^[16]。数据包括地闪发生时间、经纬度、电流、回击数、定位站数等要素。王延慧等^[17]根据近5a的数据资料对比分析了新疆ADTD和LLS两套闪电探测系统,得出了ADTD系统探测的地闪次数偏少、地闪密度偏小,而LLS系统监测的地闪强度偏小、地闪强度高值区分布较为分散。

全球闪电定位系统WWLLN是由美国研究和

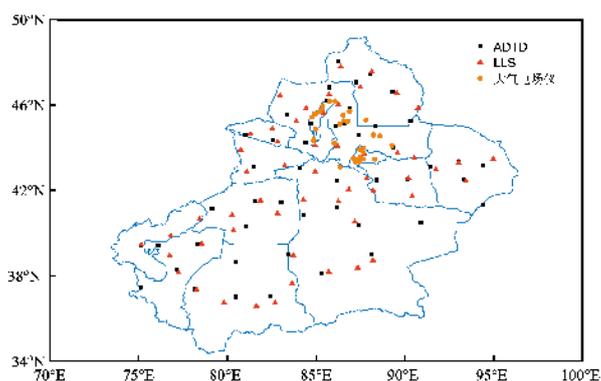


图1 新疆ADTD、LLS、大气电场仪站点分布

开发的一套旨在全球范围实时连续监测闪电活动的定位系统,该系统利用TOGA (Time of Group Arrival) 进行闪电定位,WWLLN以监测强闪电为主,数据中大部分为强地闪,少部分为强云闪,能给出闪电发生的时间、经纬度。由于测站监测的是闪电辐射甚低频(VLF)电磁信号,该波段的电磁信号能以低衰减速度稳定传播,以至于测站间的分布距离可以达到上千千米。目前亚洲地区有6个测站,分别位于中国、日本、新加坡境内。我国的3个测站分别位于南京、北京、兰州。WWLLN自投入商业化运营以来,其全球测站数目逐年增加,这也使得WWLLN能够更加有效地对全球范围内闪电活动进行连续观测^[18]。新疆目前很少有人采用全球闪电定位系统的数据资料。

风云四号静止卫星(FY-4A)携带的闪电成像仪(Lightning Mapping Imager, LMI)星下点 104.7°E , CCD面阵大小为 400×600 ,空间分辨率为7.8 km。当闪电成像仪CCD面阵单个像元探测闪电光辐射亮度高于背景阈值时,定义为一次闪电“事件”,即像元观测区域云中闪电光辐射透过云层的发光现象,对应的CCD面阵像元中心位置即为这次闪电“事件”的位置^[19-20]。同一帧CCD图像上的多个相邻微小像元探测到的闪电“事件”通过聚类算法组成一个“组”,对应于地闪的一次回击或云闪的一次K变化,满足一定阈值条件的多个“组”聚类为一次真实的“闪电”过程。数据资料来源于国家卫星中心网站提供LMI的L2级“事件”和“组”产品,“闪电”产品暂未公开,因此本文采用LMI的L2级“组”产品(LMIG)进行分析。

大气电场仪是用来测量大气电场及其变化的设备,有效探测半径约为15 km。它是利用导体在电场中产生感应电荷的原理来测量电场,雷暴地面电场是云内所有电荷共同作用的结果,当雷暴云移动时,

可引起电场的缓慢低频变化,这种变化可实现对云内的电荷区进行评估,当雷电发生时,可引起电场的快速高频变化,根据电场变化极性,可大致判断雷电发生的区域。目前,国内部分省市已开展了大气电场仪与闪电定位仪结合的雷电监测预警技术的研究。秦微等^[21]利用大气电场资料和闪电资料,根据大气电场的波形特征,提取与闪电相关性较高的因子,利用多元回归技术建立一套预报方程,根据该预报方程得出了最佳预警参数。谢屹然等^[22]根据雷暴云近地面电场变化特征,探讨了大气电场仪临近预警方法,首次提出极性变化预警法,其命中率和提前预警时间都明显优于阈值预警法。目前乌鲁木齐市有12个观测站点,克拉玛依市有22个站点已投入运行,电场分辨率 $<5\text{ V/m}$,响应时间为1 s。

2 资料分析

2.1 多源闪电监测产品

2019年7月20日全疆大部分区域出现了强对流天气过程,本文选取了这一天的闪电资料进行分析。图2分别是ADTD地闪监测产品、LMIG全闪监测产品、WWLLN全闪监测产品、LLS地闪监测产品、大气电场监测产品(地基闪电定位数据没有进行归闪处理)。由图2中可知,LLS的探测效率最高,其次是ADTD,LMIG和WWLLN虽属于全闪监测系统,但在北疆大部分区域探测的总闪频数要低于ADTD和LLS探测的地闪频数,说明LMIG和

WWLLN对地闪的探测效率较低。而在南疆部分地区LMIG探测的总闪频数高于ADTD、低于LLS,相比于LLS这主要是由于南疆部分地区ADTD监测系统不完善,探测效率较低,这也充分说明地面闪电监测系统对站点的布设较为依赖。此外,LMIG监测的高密度区与ADTD、WWLLN、LLS监测结果存在一定的差异,需要作进一步分析。图2e是一次天气过程的地面大气电场变化过程,在起始阶段和结尾阶段波形快变抖动频率较中间阶段慢,在结尾阶段表现的较为明显。

全天ADTD监测闪电频次3768次,LLS监测18327次,WWLLN监测786次,LMIG监测1206次。由于各观测系统监测闪电频数处于不同的量级,不便于直观的对比各个时段闪电频次的分布。因此,本文将闪电频次归一化处理,图3是归一化后ADTD、LLS、WWLLN、LMIG各时段的闪电频次分布。ADTD、LLS、WWLLN监测闪电发生时段主要集中在12—23时,而LMIG主要集中在16—23时。ADTD、LLS、WWLLN各时段闪电频次变化基本一致,16时是闪电高发时段,而LMIG监测闪电高发时段是22时。

2.2 星地多源闪电资料应用的个例

2019年7月20日乌鲁木齐市发生一次局部强对流天气过程。图4是19—23时(北京时间,下同)乌鲁木齐雷达站组合反射率部分图(数据经过质量控制)。19时对流云团由石河子经呼图壁、昌吉向乌

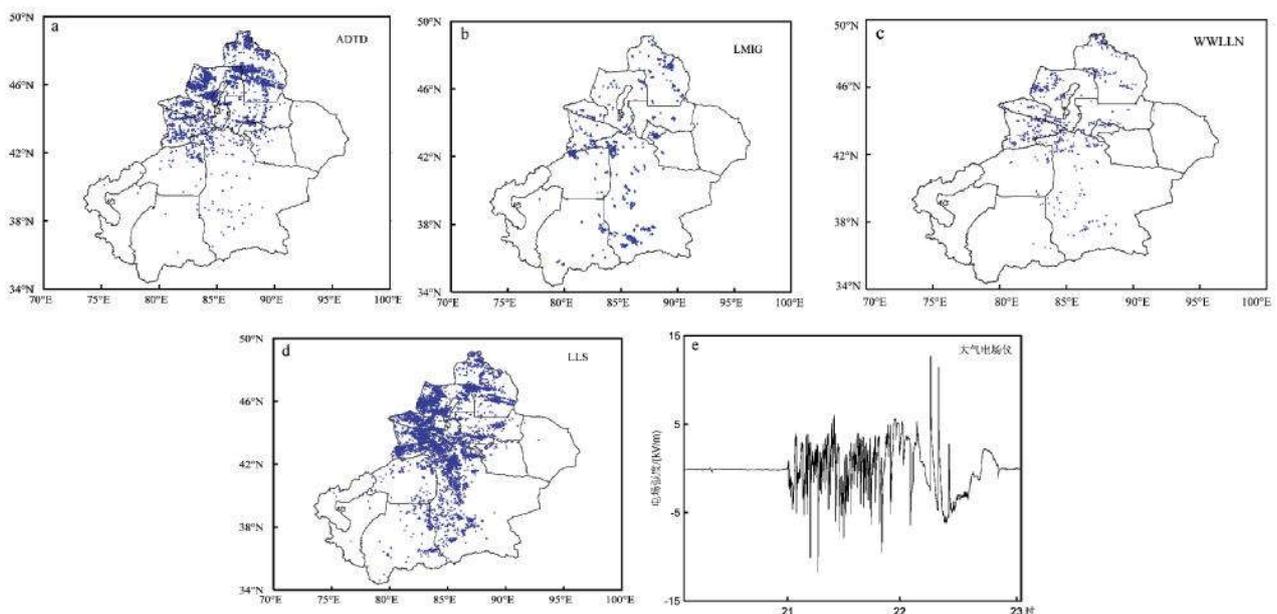


图2 多源闪电数据监测产品
(a为ADTD,b为LMIG,c为WWLLN,d为LLS,e为大气电场仪)

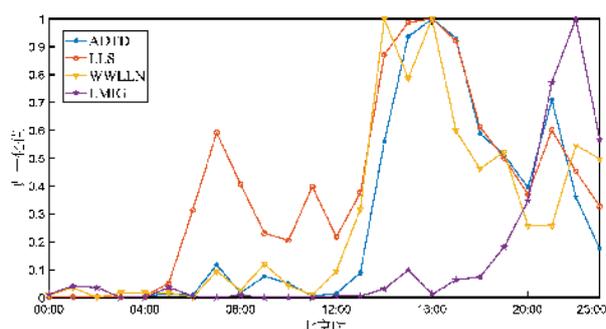


图3 归一化后 ADTD、LLS、WWLLN、LMIG 各时段闪电频次分布

乌鲁木齐移动,21时在乌鲁木齐市天山区附近对流云团发展至旺盛阶段,22时对流云团逐渐减弱。此次天气过程,属于局部小范围天气过程,降雨量不大,但雷暴强度是近几年罕见的,雷达监测到了此次天气过程基本完整的发展路径。

图5分别是ADTD、LLS、WWLLN、LMIG监测的北京时间18—00时以乌鲁木齐雷达站为中心周围150 km的闪电分布情况。沿着此次强对流天气移动路径上ADTD、LLS、WWLLN三者时间和空间上基本对应一致,仅是探测效率有所差别(路径以外局部的闪电数据暂不考虑,由于雷达被地物遮挡或雷达监测的此次天气过程不全,无法参考雷达从时间和空间上进行比对)。而LMIG监测的闪电主要发生

时段是22—00时,高密度区位于达坂城区域,且在乌鲁木齐天山区附近没有监测到闪电,监测结果与前三者在时间和空间上都存在差异。通过查询22—00时雷达组合发射率和基本反射率情况,发现在该区域没有对流天气过程,因此初步认为这可能是由于LMIG数据出现了偏差。

考虑到雷达可能会受到地物的遮挡,进一步分析了风云四号卫星云顶亮温资料。卫星携带的多通道扫描成像辐射计AGRI可获取地球表面和云的多光谱、高精度定量观测数据和图像,采用双扫描镜结合三反射光学系统、线列阵探测器,可以全天空、实时监测地面的强对流天气过程,通过红外探测技术,能够感知对流云顶的亮温。AGRI分为两种扫描模式:全圆盘扫描(扫描时间15 min),中国区域扫描(扫描时间为4 min)。两种扫描方式交替进行。云顶亮温可用来表征对流活动,亮温越低,表明云顶越高,云层越厚,对流越旺盛^[23],闪电通常是发生在强对流区域。图6是22:00—00:00乌鲁木齐地区云顶亮温部分图,与LMIG监测结果相对应区域的云顶气温分布在270~290 K(虚线圆圈区域),对应的摄氏温度为-4~17℃,根据每上升1 km温度下降6℃,可以判断该时段内此区域没有强对流云,风云四号卫星监测的云顶越高更可能是地表温度。进一步论证了LMIG数据存在一定偏差,这可能是由于新疆

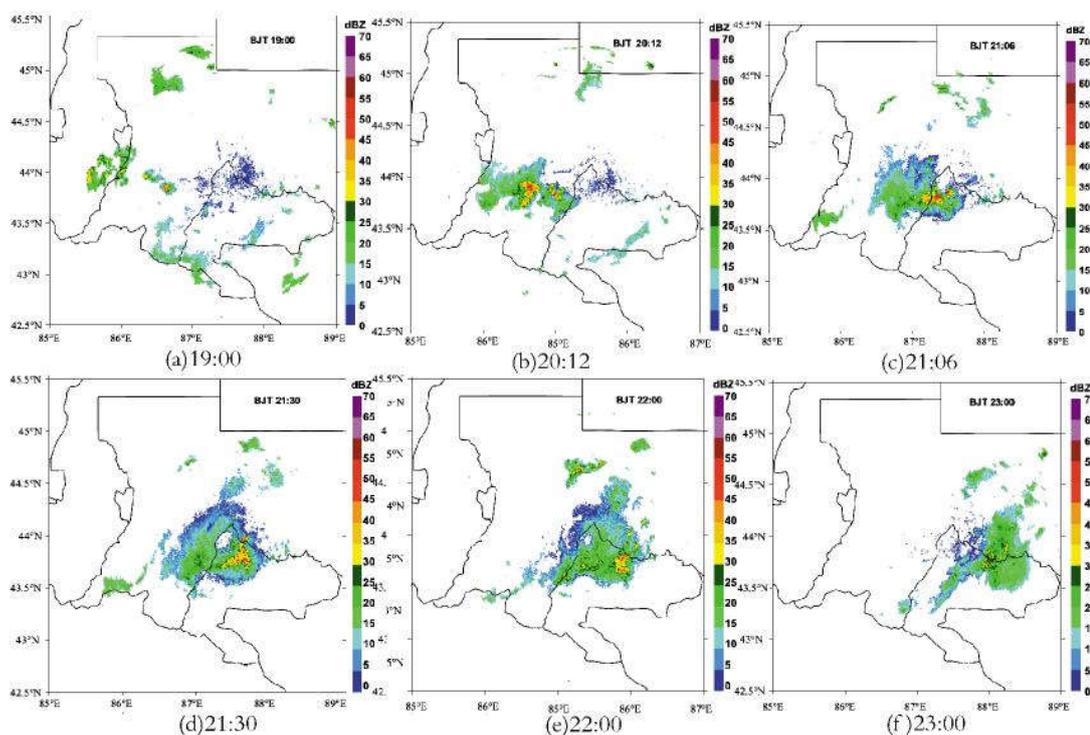


图4 2019年7月20日19—23时乌鲁木齐雷达站组合反射率

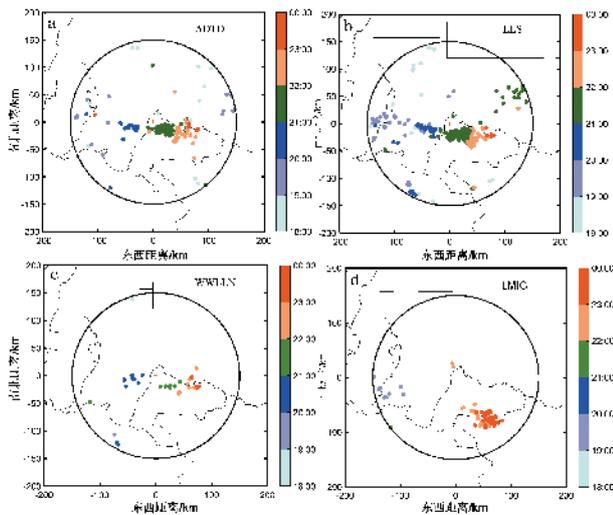


图5 北京时间18—00时以乌鲁木齐雷达站为中心周围150 km的闪电分布
(a为ADTD,b为LLS,c为WWLIN,d为LMIG)

处于风云四号卫星监测的边缘,距离星下点较远,像元分辨率较大,导致出现偏差。因此,使用LMI数据前需要利用相关资料进行数据检验。

大气电场仪可以直观地看出监测区域内电场强度的变化情况,能够记录闪电发生前后雷暴云中闪电活动情况。图7是天山区气象站内的大气电场仪监测的此次天气过程地面电场强度和闪电的分布情况(以大气电场站点为中心,ADTD、LLS、WWLIN分别监测的周围40 km闪电分布)。当大气电场仪周

围15 km有闪电发生时,电场强度值会出现快变抖动现象,随着闪电发生位置越来越近快变抖动会越来越频繁,而随着闪电发生位置越来越远时,电场值的快变抖动会变慢,且逐渐转为缓慢变化,这种现象主要是云层或者云地之间频繁的放电现象,导致云层电荷量的变化。另外,在雷暴云接近大气电场仪且伴随放电现象时,电场值的变化应由缓慢到频繁的快变抖动,而图7中ADTD、LLS初始阶段都出现了闪电成竖排列,且电场值变化出现不明显的现象,这主要是由于大气电场测站为了减小数据量,在没有雷暴云靠近时采样率为1 min 1个数据,当雷暴云靠近且伴随着电场值达到一定强度时触发采样率为1 min 1 s一个数据,这导致了初始阶段采样间隔过大,部分电场数据丢失,而初始阶段是目前利用大气电场仪开展雷电监测预警的关键阶段,因此这是大气电场仪目前需要改进的地方。

单独利用大气电场仪开展雷电监测临近预警(旅游景区、机场、油库等)存在的主要问题:易受外界电磁场干扰,触发阈值难以判断,导致出现虚警太多。因此,目前国内外大多采用闪电定位和大气电场两种设备相结合的方法。大气电场仪可以对其上空一定半径内的云层带电状况进行监测,闪电定位仪能够监测闪电的发生时刻及位置,因而可以从宏观上看到闪电的分布及走向,但是新疆并不完全适用这种方法,因西北地区不是闪电的高发区,部分局部

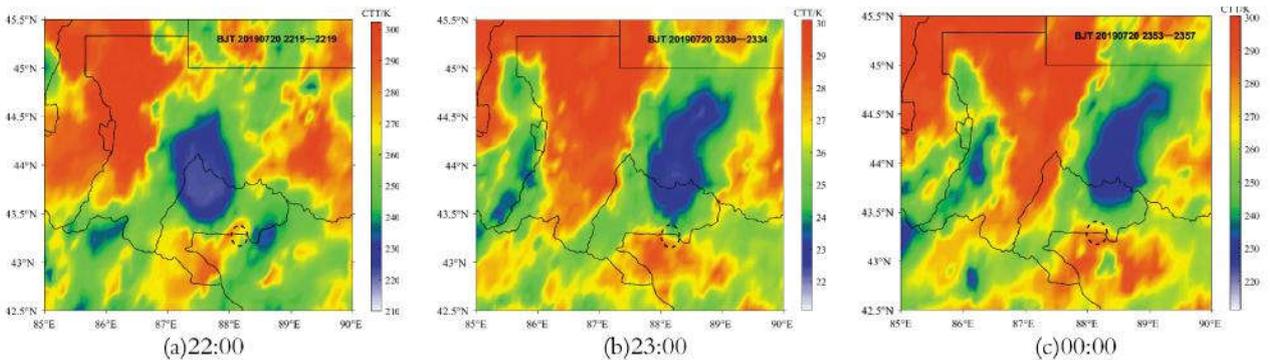


图6 22—00时乌鲁木齐地区部分云顶亮温

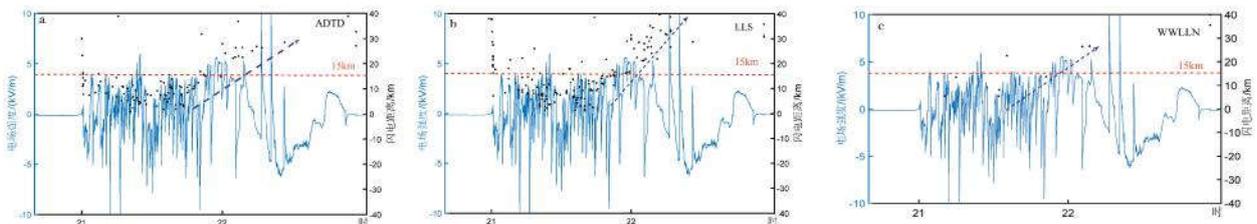


图7 天山区站大气电场强度变化及周围40 km闪电分布

(a为ADTD,b为LLS,c为WWLIN;以天山区大气电场监测站为中心;红色虚线表示大气电场有效探测范围15 km;蓝色虚线表示随闪电发生距离越来越远,大气电场快变抖动越来越慢)

小范围对流天气过程中地闪频次只有几次,甚至一次,由于监测地闪频次太少,无法根据闪击点与大气电场之间存在的对应关系,找到较为理想的预报因子。因此,在新疆结合大气电场仪开展雷电临近预警需要借助其他手段或方法,如将星地多源数据融合再与大气电场仪结合。

3 结论

(1)新疆星地多源闪电观测资料中 LLS 对地闪探测效率最高,LMIG 和 WWLLN 对地闪探测效率较低。卫星全天空、实时监测,可以弥补南疆地面观测站覆盖不到的区域,两者可互为补充。

(2)强对流天气移动路径上 ADTD、LLS、WWLLN 三者定位结果在时间和空间上对应基本一致,仅是探测效率上有所差别。

(3)新疆部分 LMIG 数据存在时间和空间上的偏差,使用前需要利用相关资料进行数据检验。

(4)闪电发生位置距离大气电场仪较近时,电场值会出现频繁的快变抖动现象,而随着闪电发生位置越来越远,电场值的快变抖动频率会变慢,且逐渐转为缓慢变化。新疆大气电场仪起始阶段采样间隔过大导致部分数据丢失,不利于预警阈值的设定,需进一步改进。大气电场仪可以作为雷电临近预警的一种辅助手段,下一步将对存在偏差的 LMIG 数据进行分析,开展多源数据的融合,更加准确地分析新疆地区闪电活动特征,并结合大气电场仪建立雷电监测预警方法。

参考文献:

- [1] 崔逊,高金阁,樊荣.WWLLN 与江苏省 ADTD 闪电定位系统数据的对比分析 [J]. 大气科学学报,2016,39(2): 270-279.
- [2] 张华明,钱勇,刘恒毅,等.山西省两套闪电定位系统地闪监测结果对比[J].干旱气象,2020,38(2):346-352.
- [3] 惠雯,黄富祥,郭强.卫星与地基闪电探测资料在闪电活动研究中的综合应用 [J]. 光学精密工程,2018,26(1): 218-229.
- [4] 朱杰.星地闪电探测系统在中国区域探测数据对比分析 [J].地球物理学进展,2018,33(2):541-546.
- [5] 宋强,王基鑫,傅朝,等.甘肃一次冰雹过程降水及闪电活动特征[J].干旱气象,2019,37(3):400-408.
- [6] 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.
- [7] ZHANG W J, HUI W, LYU W T, et al. FY-4A LMI observed lightning activity in super typhoon mangkhut (2018) in comparison with WWLLN data [J]. Journal of Meteorological Research, 2020, 34(2): 1-17.
- [8] YANG J, ZHANG Z Q, WEI C Y, et al., Introducing the new generation of Chinese geostationary weather satellites. Fengyun-4 [J]. Bull Amer Meteor Soc, 2017, 98(1): 1637-1658.
- [9] 王娟, 谌芸. 2009—2012 年中国闪电分布特征分析 [J]. 气象, 2015, 42(2): 160-170.
- [10] Shvets A, Hayakawa M. Global lightning activity on the basis of inversions of natural ELF electromagnetic data observed at multiple stations around the world [J]. Surveys in Geophysics, 2011, 32(6): 705-732.
- [11] 鄯秀书, 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.
- [12] 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.
- [13] 柴瑞, 王振会, 肖稳安, 等. 大气电场资料在雷电预警中应用 [J]. 气象科技, 2009, 37(6): 724-728.
- [14] 曾庆锋. 雷暴云地面电场特征和基于多源观测资料的雷电预警研究 [D]. 南京: 南京信息工程大学, 2013.
- [15] 马超, 周雅蔓, 李伟. 闪电定位资料在天山北坡强对流天气短临预警中的分析及应用 [J]. 沙漠与绿洲气象, 2020, 14(1): 49-55.
- [16] 赵伟, 姜瑜君, 童杭伟, 等. 浙江省两套闪电定位系统地闪数据对比 [J]. 应用气象学报, 2015, 26(3): 354-363.
- [17] 王延慧, 刘忠全, 叶文军, 等. 新疆两种闪电定位系统探测资料的对比分析 [J]. 电瓷避雷器, 2019(4): 35-43.
- [18] 杨宁. 全球闪电定位系统(WWLLN)探测精度分析及在台风闪电监测中的应用 [D]. 南京: 南京信息工程大学, 2012.
- [19] 曹冬杰, 陆风, 张晓虎, 等. 风云四号卫星闪电探测产品在强对流天气监测中的应用 [J]. 卫星应用, 2018(11): 18-23.
- [20] 陈亚芳, 张其林, 张晓黄, 等. 风云四号闪电成像仪聚类算法的参数化方案 [J]. 电瓷避雷器, 2019(2): 103-108.
- [21] 秦微, 张其林, 姜苏, 等. 基于大气电场资料的雷电临近预警研究 [J]. 南京信息工程大学学报, 2016, 8(3): 247-251.
- [22] 谢屹然, 徐开, 张腾飞, 等. 低纬高原大气电场特征及其在预警中的应用 [J]. 灾害学, 2012, 27(3): 34-38.
- [23] 孙萌宇, 鄯秀书, 孙凌, 等. 北京城区相继多次降雹的一次强雷暴的闪电特征 [J]. 大气科学, 2020, 44(3): 601-610.

Application of the Satellite-based Lightning Imaging Sensor and the Ground-based Lightning Location System in Xinjiang

QIAN Yong¹, SHI Junjie², WANG Yanhui¹, LIU Chengwu², ZHANG Xiaojun³, ZHANG Jiantao⁴

(1. Meteorological Disaster Prevention Technology Center of Xinjiang, Urumqi 830002, China;

2. Xinjiang Meteorological Observatory, Urumqi 830002, China;

3. State Grid Electric Power Research Institute of Xinjiang Electric Power Company, Urumqi 830011, China;

4. Institute of Desert Meteorology, China Meteorological Administration, Urumqi 830002, China)

Abstract According to the partial severe convective weather in the most areas of Xinjiang on July 20th, 2019, the application was compared and analyzed on the basis of these five observation data from Active Directory Topology Diagrammer (ADTD), Lightning Locating System (LLS), World-wide Lightning Location Network (WWLLN), Fengyun-4A Lightning Mapping Imager Group (LMIG), and atmospheric electric field. The results show that the detection efficiency of LLS to cloud to ground (CG) was higher than that of LMIG and WWLLN; the location results of ADTD, LLS and WWLLN were basically the same in time and space, but the detection efficiency was different; some LMIG data had deviations in time and space, which need to be checked before using; satellite full sky and real-time monitoring can make up for the areas that cannot be covered by ground observation stations, and the two could complement each other.

Key words lightning locating system; Fengyun-4A satellite (FY-4A); atmospheric electric field; detection efficiency