

文章编号:1004-4574(2012)04-0182-08

海南文昌火箭发射场雷电环境分析

高 焱^{1,2}, 陈汇林³, 劳小青¹, 蒙小亮¹, 林海滨¹

(1. 海南省防雷中心, 海南海口 570203; 2. 中国气象科学研究院 雷电物理和防护工程实验室, 北京 100081;
3. 海南省气象科学研究所, 海南海口 570203)

摘要:利用海南省18个气象台站的雷暴人工观测资料和海南闪电定位网的观测资料,分析了海南文昌火箭发射场的雷暴特征和雷电环境,结果表明:海南岛的中部和北部雷暴活动较强,西部、东部和南部近海地区的雷暴活动较弱,文昌发射场处在北部较强的雷暴区;采用Kriging(克里格)方法拟合的结果为文昌火箭发射场雷暴日数的年变化从1982年以后逐渐减少,发射场一年中各月都有雷暴发生,4-10月为雷暴高发期;发射场西部、西北部和北部区域雷暴活动较其它区域要强,79%的雷电流强度小于40 kA,而只有5.9%的雷电流强度大于60 kA,一天中闪电的发生有两个高峰时段,一个出现在凌晨5时到6时,另一个时段出现在14时到18时,午后15时左右是闪电活动最频繁的时段。

关键词:雷暴;火箭发射场;环境分析;海南省

中图分类号:P446

文献标志码:A

Analysis of environmental characteristics of thunderstorm activities at Wenchang Rocket Launching site in Hainan Province

GAO Yi^{1,2}, CHEN Huilin³, LAO Xiaoqing¹, MONG Xiaoliang¹, LIN Haibin¹

(1. Hainan Provincial Lightning Protection Center, Haikou 570203, China; 2. Laboratory of Lightning Physics and Protection, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China;
3. Hainan Institute of Meteorological Science, Haikou 570203, China)

Abstract: With the observed thunderstorm data of 18 meteorological stations and VLF lightning locating networks data in Hainan Province, the thunderstorm environment and the characteristics of the thunderstorm activities were analyzed for the Wenchang Rocket Launching Site. The results indicate that the thunderstorm activities in the central and northern parts are stronger than those in the western, eastern and the southern coast. The Wenchang Rocket Launching Site is located in the northern area where thunderstorm activities are strong. Fitting results using the Kriging method shows that annual thunderstorm days (T_d) of the Wenchang Rocket Launch Site have reduced gradually after 1982. Thunderstorm activities occur all the year round, and are much stronger in months from April to October than in other months, west, northwest and north of the Launch Site have stronger thunderstorm activities than other areas. 79% of the lightning currents have the strength lower than 40 kA, while only 5.9% of the lightning currents have the strength higher than 60 kA. The occurrence of the lightning flashes has two peak time intervals in a day, one appears from 5:00 am to 6:00 am, and the another appears from 2:00 pm to 6:00 pm. The

收稿日期:2011-12-14; 修回日期:2012-02-10

基金项目:海南省重点科技计划项目(ZDXM20120057);海南省自然科学基金项目(40882);海南省气象局科技创新团队项目(HN2010TDA17)

作者简介:高焱(1966-),男,高级工程师,主要从事雷电监测和雷灾评估研究. E-mail:qjgaoyi@qq.com

highest frequency of lightning flash activities occurs around 3:00pm in the afternoon.

Key words: thunderstorm; rocket launching site; environment analysis; Hainan Province

海南岛位于北纬 $18^{\circ}14'$ – $20^{\circ}02'$ 之间,属热带季风气候区,对流天气强盛,雷电灾害频繁。据中国气象局最新发布的全国雷暴日数(T_d)图,年平均雷暴日数在100 d以上的地区分别为海南岛、云南南部、广西南部和雷州半岛,其中海南岛澄迈县最高,其年平均雷暴日数高达123 d,王义耕^[1]通过TRMM卫星观测资料分析了华南地区的闪电分布,也发现在海南岛的中部有一个闪电密度的高值区,而低值区主要位于南海的水面上。据不完全统计,2002–2010年海南省雷灾总数534起,131人死亡,157人受伤,直接经济损失达到3 104.19万元,造成间接经济损失近亿元,海南岛成为了全国的高雷暴区和雷电灾害最严重的地区之一。海南文昌火箭发射场位于文昌市境内的东部海岸,文昌市位于海南省东北部,地处东经 $110^{\circ}28'$ 至 $111^{\circ}03'$,北纬 $19^{\circ}20'$ 至 $20^{\circ}10'$ 之间,全市东北南三面临海,其中东南和北面是南海和琼州海峡,海域辽阔,海岸线长206.7 km,文昌市属热带季风海洋型气候,地处东西风带频繁交替的天气气候带,雨季主要集中在5–10月份,3–11月常受到热带气旋的影响,雷暴等灾害性天气频繁发生,年平均雷暴日数91d,也是海南岛内的高雷暴区域。

火箭发射对雷电活动和空间电条件的要求较高,进入发射时间窗后要求无雷暴或闪电,火箭使用液氢、液氧作为推进剂,地面或高空中的火花,都可能将其引爆甚至炸毁整个场区,因而从加注燃料到火箭发射的时段内,发射场区附近数十公里出现雷电活动产生的30 kHz以下的电磁波都会对火箭的控制、遥测系统产生干扰^[2],影响运载火箭的成功发射。美国1986–1987年间共发生5次航天器发射失败事件4次都是因为雷电所致,最著名的是1987年3月在佛罗里达州卡纳维拉尔角空军基地大力神/半人马座A/C67飞行器的损失^[3],另外,文昌火箭发射场将采用新一代运载火箭进行载人航天的发射,火箭本身大而长,在发射升空穿过带电云层时,由于飞行体的扰动使空间电场强度和分布发生畸变也有可能触发闪电,从而使火箭遭受雷击,1969年8月美国在发射“土星V–阿波罗12”火箭时,当升空飞行了36.5 s后,火箭遭到雷电闪击发射失败^[2]。所以发射场及其周边的雷暴特征和雷电环境研究成为了一个非常重要的课题。

随着雷电灾害日趋严重,针对雷电活动规律的研究也多了起来,吴孟恒等人^[4–6]利用本省的雷暴资料和雷电灾害资料分析统计了雷暴的时空分布特征和雷电灾害的成因,刘晓东^[3]利用内蒙古115个气象站的雷暴观测资料和小波分析方法对神州飞船发射场和主着陆回收场的雷暴活动规律进行了研究,给出了两场区雷暴都具有2 a,4 a的短周期及20 a的长周期震荡变化规律。王义耕^[1]、戴建华^[7]利用TRMM卫星观测资料分别对华南地区和长江三角洲地区的闪电活动规律进行了分析,周筠珺^[8]利用搭载于卫星上OTD(光学瞬变探测器)和LIS(闪电成像传感器)所取得的资料分析了西南及其周边地区雷电活动的特征,发现由于这些地区的地形及下垫面性质差异较大,使得雷电的空间分布极不均匀。近年来,多个地区建立起了使用VLF传感器的区域网络,并利用磁定向法(DF)和时差法(TOA)技术定位闪电的发生时间和位置,同时利用附加的电场传感器以确定地闪的极性(正或负),利用地闪VLF辐射场的峰值与地闪峰值电流的相关性,给出地闪强度^[9]。这些闪电定位系统的探测资料为分析雷电活动规律和雷电预警预报提供了有益的帮助,张腾飞等^[10–11]利用闪电定位网的探测资料分析了雷电活动特点、雷电发生的环境条件和雷电活动的气候特征。

本文根据特殊需求,以文昌火箭发射场为重点区域,利用海南18个气象台站50 a左右的人工观测雷暴资料,采用Kriging插值方法,分析计算火箭发射场区雷暴的年际变化和月际变化特征,并依据海南闪电定位网的闪电观测资料,分析了火箭发射场区40 km范围内的雷电流和雷电密度的空间变化规律和24 h闪电变化特征。

1 资料和方法

海南岛现有气象台站18个,最早有观测资料的是海口站,从1951年就有观测的雷暴资料,最晚的定安、昌江、东方和保亭从1963年开始也有人工观测的雷暴资料,各站年限长度不一,本文数据来源于各站建站至2007年的统计结果,各站资料年限见表1,最长年限57 a,最短年限也有45 a。

表 1 海南岛 18 个站雷暴观测资料

Table 1 Observed data on thunderstorm from 18 meteorological stations in Hainan Island

序号	站	T_d/d	年数/a	序号	站	T_d/d	年数/a	序号	站	T_d/d	年数/a
1	海口	100.2	57	7	儋州	113.6	55	13	东方	78	45
2	文昌	91.3	49	8	琼海	86.3	55	14	乐东	90.9	46
3	澄迈	123.2	49	9	琼中	103.7	52	15	保亭	101	45
4	临高	97.8	46	10	白沙	114.2	49	16	万宁	70	49
5	定安	109.7	45	11	通什	112	49	17	陵水	81.3	52
6	屯昌	111.3	49	12	昌江	86.1	45	18	三亚	60.5	47

由于文昌气象观测站距火箭发射场距离较远,为了更好地反映发射场的雷暴活动情况,采用 Kriging 插值方法进行计算^[12]。Kriging 插值法是一种光滑的空间自协方差最优内插法,它首先考虑的是空间属性在空间位置上的变异分布,确定对一个待插点值有影响的距离范围,然后用此范围内的采样点来估计待插点的属性值。该方法在数学上可对所研究的对象提供一种最佳线性无偏差估计(某点处的确定值)的方法。它是考虑了待估计块段相互间的空间位置等几何特征以及品位的空间结构之后,为达到线性、无偏和最小估计方差的估计,而对每一个样品赋予一定的系数,最后进行加权平均来估计块段品位的方法。对于气象物理量场,采用球面模型变异函数公式来计算权重系数^[13]:

$$C_0 + C_1(1.5h/a - 0.5(h/a)^3), \quad \text{当 } |h| \leq a \text{ 时};$$

$$C_0 + C_1, \quad \text{当 } |h| > a \text{ 时}.$$

其中, a 为球面模型的半径,单位:经纬距,对于描述不同尺度天气系统的观测资料需要设置不同的半径值; h 为观测场之间或观测场与估计点之间的直线距离,单位:km,为各点的地理坐标经度差值以及纬度差值平方和的平方根; C_0 为近距离效应补偿参数,对于海南岛 18 个台站球面模型的半径 a 取 10 时,所有观测站点均落在模型区域内该值可设为 0; C_1 为放大系数,为保证预测值的准确,一般不进行放大或缩小, C_1 设为 1。

对 18 个站的雷暴日资料进行 Kriging 计算。插值数据是分析火箭发射场雷暴年际变化和月际变化特征的基础。

海南的闪电定位网由 6 个子站组成,分布于全海南岛及西沙永兴岛,从 2006 年下半年开始调试运行,2009 年下半年运行不稳定,2010 年由中国局安排全部更换为统一型号的闪电定位系统,本文选取了 2007 年和 2008 年两年完整不间断的资料进行统计分析。采用 $5 \text{ km} \times 5 \text{ km}$ 网格大小,以火箭发射场地源站为中心分析发射场区域 40 km 范围的闪电密度空间分布和雷电流强度特征。采用这二年的闪电资料分析 24 h 的闪电日变化特征。

2 结果分析与讨论

2.1 雷暴的空间分布特征

对各市县的人工观测雷暴日资料,逐年统计并根据不同资料时长进行年平均计算,得到了海南 18 个市县的多年平均雷暴日数(表 1),年平均雷暴日数超过 100 d 的市县有 9 个,占 18 个市县的一半,超过 90 d 的有 12 个,占 67% 左右,超过 80 d 的有 15 个,占 83% 左右,年平均雷暴日最少的东方、万宁和三亚 3 个市县在 60 d 到 80 d 之间,最少的三亚超过了 60 d ,所有市县都属强雷暴区。发射场所在的文昌市年平均雷暴日数也较强,超过了 91 d 。图 1 给出了海南岛年平均雷暴日数的空间分布特征,从图中看出,海南岛的中部和北部雷暴活动较强,以东方、万宁和三亚为代表的西部、东部和南部的近海地区雷暴活动偏弱,文昌发射场年平均雷暴日数也有 88 d ,处在北部较强的雷暴区。这样的空间分布不均匀特征除了与大尺度的天气系统有关,还与下垫面性质、地形抬升有关。

海南岛地处低纬热带地区,一年四季太阳光热充足,太阳辐射较强,太阳加热地面形成长波辐射加热大气有利于形成局地强对流雷暴天气,所以海南岛四季都可能出现雷暴,从地形地貌看,海南岛四周低中部隆起,又地处东亚季风区的南端,暖湿气流的抬升,形成大气层结不稳定的条件,从而产生了中部山区较强的雷电天气。海南岛四周环海,在近海地区下垫面的性质完全不同,对流时节海区的近地层温度往往比陆地低,大气层结相对较稳定,对流发生的可能性较小,所以近海地区的雷暴活动偏弱。拟合得到的发射场的年平均雷

暴日较文昌站偏少 3 d 左右,主要是因为发射场的东部五公里处正好是海拔 338 m 的铜鼓岭山区,发射场处在背风坡的下沉气流控制,不利于热力和动力抬升条件的形成,抑制了对流的发生,从而雷暴活动相对 18 km 外的文昌气象站较少。从大尺度上来看,海南岛常年受台风影响较为严重,不仅带来了大风降水,也伴随着产生了大量的闪电活动,所以全岛的雷暴活动和雷电灾害都成为我国最严重的地区之一。

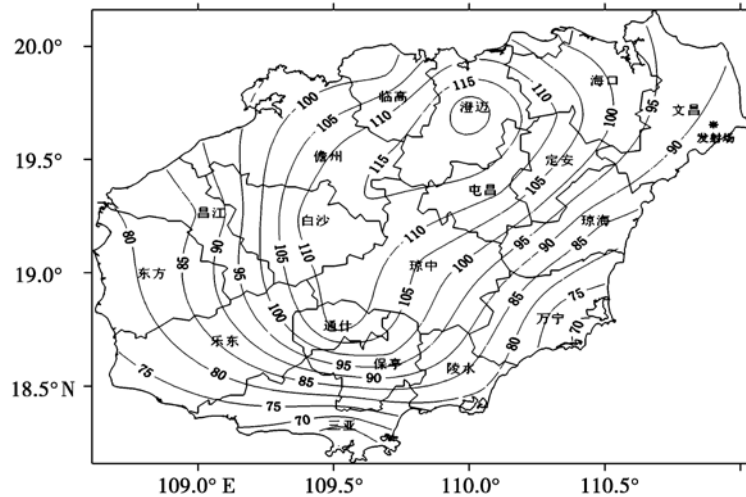


图1 海南岛年平均雷暴日空间分布图(单位:d)

Fig. 1 Spatial distribution of annual average thunderstorm days in Hainan Island(unit:d)

2.2 发射场雷暴年际变化特征

图2是采用Kriging方法拟合的文昌火箭发射场从1963-2007年的雷暴日数逐年变化情况,1997年出现了131 d的峰值,1982年以前数值较高,之后逐渐减小,2003年至2007年间都只有60 d左右,最低52 d出现在2006年,只有最高年份的39%,45 a间呈逐年下降的趋势,年平均雷暴日为88 d。值得注意的是,1983年至1996年都基本在正常年份之下,1996年只有69 d,而1997年却达到了45 a的最高值131 d,比正常年份高出了48.8%,这个时间段正好与1997年春夏之交开始一直持续到1998年春季的El Niño相吻合,周筠珺^[8]等研究也表明雷电数的年际变化受El Niño和La Niña等气候异常事件的影响较大,说明闪电活动对气候异常事件的响应较为敏感,也许闪电活动可以作为气候变化的一个指示器。

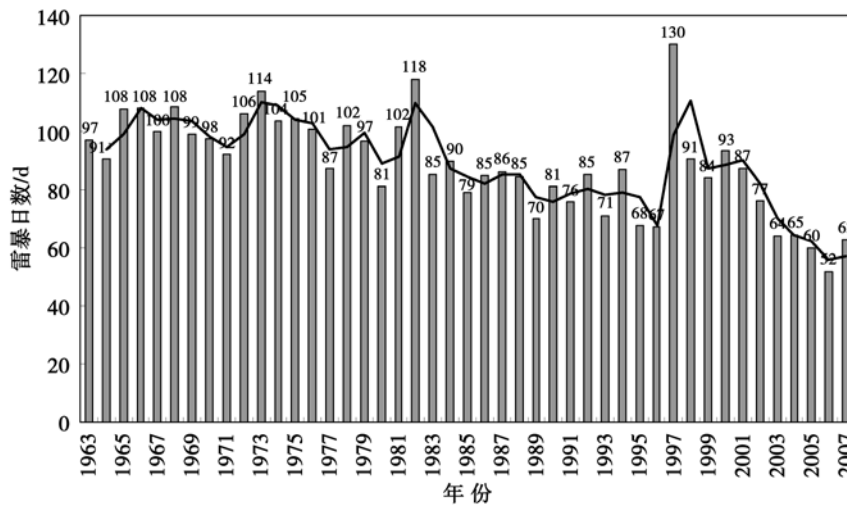


图2 文昌火箭发射场雷暴日数年际变化

Fig. 2 Interannual change of thunderstorm days in Wenchang Rocket Launching Site

不同年份出现雷暴很不均匀,我们选取海南岛北部5个市县的年雷暴日数实际观测值进行比较,发现年雷暴日数也是逐年减少(图3),雷暴日数逐年减少似乎与气候变暖的大背景相悖,当然这样的统计并不意味着未来也是下降趋势,可能包括自然因素,确实减少,也有可能是经济的发展导致气象台站观测环境受到

限制的原因,尽管观测事实表明雷暴日在减少,但由于气候变暖,极端天气事件增多,强天气次数增加,导致某些地区或时段雷暴日增加也是完全可能的。

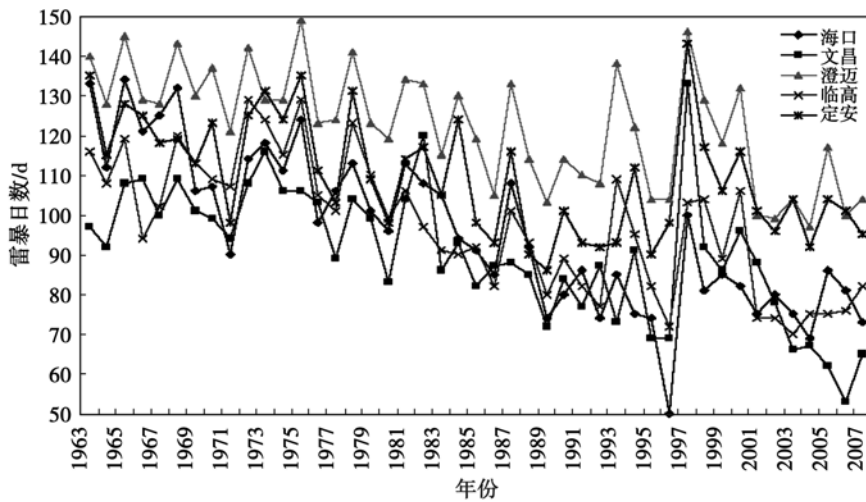


图 3 海南北部 5 市县雷暴日数年际变化

Fig. 3 Interannual change of the thunderstorm days in northern 5 cities of Hainan Island

2.3 发射场雷暴的季节变化特征

图 4 是采用 Kriging 方法拟合的文昌火箭发射基地从 1963 - 2007 年的月平均雷暴日数变化情况,从拟合数据来看发射场各月都有雷暴发生,1 月和 12 月相对较少只有 0.07 和 0.09 d,2 月和 11 月也不到 1 d,较多的月份出现在 8 月和 5,6 月,都在 15 d 以上,其中 1997 年 6 月出现峰值为 28.8 d,几乎全月每天都有雷暴发生。一年中 4 - 10 月为雷暴高发期。如果按季节来统计可以看出,雷电的季节性特征非常明显,夏季最为活跃多达到 46.8 d 平均每月 15.6 d 有雷暴发生,春季次之,秋季第三,冬季最少,雷暴活动平均不足 1d。我们知道大气层结不稳定条件、水汽条件和触发机制是对流性天气发生、发展的 3 个重要因子,郭冬艳^[14] 等人对 500 hPa 大气环流背景分析,表明 5 - 9 月是海南雷暴活动的盛发期,主要原因是副热带高压脊撤出南海,且孟加拉湾有深槽,海南地区由槽前西南风控制,强大的西南季风气流控制了南海大部分地区,暖湿的西南气流与撤出南海地区的副热带高压南侧的偏东气流交汇,容易形成南海夏季风槽,有利于大范围深对流出现,可以说副高的强弱是影响海南雷暴活动的一个重要大气环流背景条件。从这个天气尺度的意义上来说文昌火箭发射场的雷暴高发期发生在一年中的 4 - 10 月也是不难理解的。

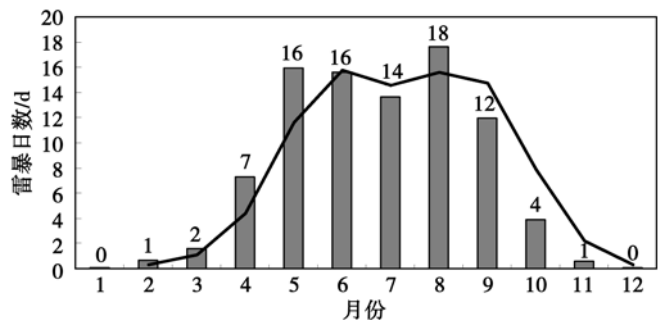


图 4 文昌火箭发射场雷暴日数月际变化

Fig. 4 Monthly change of thunderstorm days in Wenchang Rocket Site

2.4 发射场地闪频数和强度特征

发射场的地闪频数和雷电流的强度可以从闪电定位系统的观测数据中计算得到,取网格点为 5 km × 5 km,选取中心点 8 个网格点,分别计算落入每一个网格点的闪电,并对落入该网格点闪电的雷电流强度求平均值代表该网格点的雷电流强度,以每一网格点内每年的闪电次数代表该网格点的地闪频数,用地闪频数值在 surfer 上作等值线图(图 5)。

发射场 40 km 范围内的 2 a 共发生地闪 2 998 次,平均每年发生地闪 1 499 次,分布在格点内的地闪频数值从 4.5(次·a⁻¹)至 47.5(次·a⁻¹)不等,空间分布为北部、西北部和西部区域地闪频数相对较高,龙楼以东的铜鼓岭区域有一个相对高值区,东部、东南部和南部区域地闪频数较小,这可能是两个原因所致,一是东南部区域已经位于海上,闪电定位网的探测效率不高,二是向南区域已经进入了以万宁为代表的海南岛东部雷暴偏弱区。而龙楼东部处在铜鼓岭的背风方向,不利于气流抬升产生强对流,所以铜鼓岭的迎风坡方向有一个小高值区,背风坡方向地闪频数较小,但可以确定的是发射场的西部、西北部和北部区域雷暴活动较其它

区域要强。

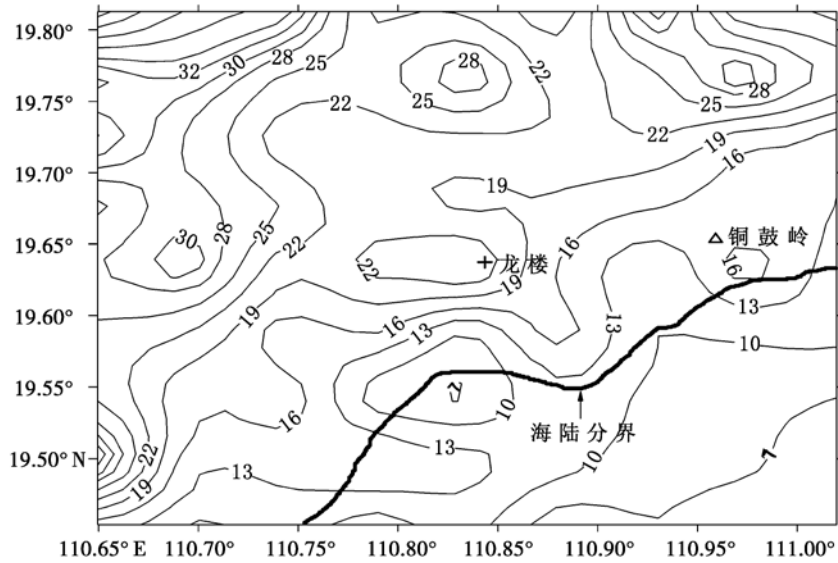


图5 文昌发射场及周边地闪频数(单位:次· a^{-1})

Fig. 5 Lightning frequency in periphery of Wenchang Rocket Launching Site

事实上,网格点的大小对格点内的平均雷电流大小影响较大,选取不同网格点计算出的平均雷电流不尽相同,选取网格点 $5\text{ km} \times 5\text{ km}$ 计算每一网格点内的平均雷电流,最大雷电流只有 51 kA ,最小值为 20 kA ,格点内的平均雷电流在 32 kA 左右,而选取网格点 $2\text{ km} \times 2\text{ km}$ 计算每一格点内的平均雷电流,最大雷电流为 69 kA ,最小值为 0 kA ,格点内的平均雷电流为 33 kA ,可见当取较小的格点时,完全有可能出现没有落雷的情况,当然也就没有雷电流发生,网格点越大平滑处理后的影响越大,格点内的平均雷电流的最大值会变小,最小值会变大,所以计算一定范围雷电流大小的累积概率,是表征特定区域雷电流强度特征的较好方法。图6是以发射场地源为中心 20 km 为半径的雷电流强度计算结果,闪电发生时 5.9% 的雷电流强度大于 60 kA , 21% 的雷电流强度大于 40 kA , 75% 的雷电流强度大于 20 kA ,也就是说在发射场区域探测到的闪电有 79% 的雷电流强度小于 40 kA ,而只有 5.9% 的雷电流强度大于 60 kA ,大部分雷电流强度都是小于 40 kA 的。

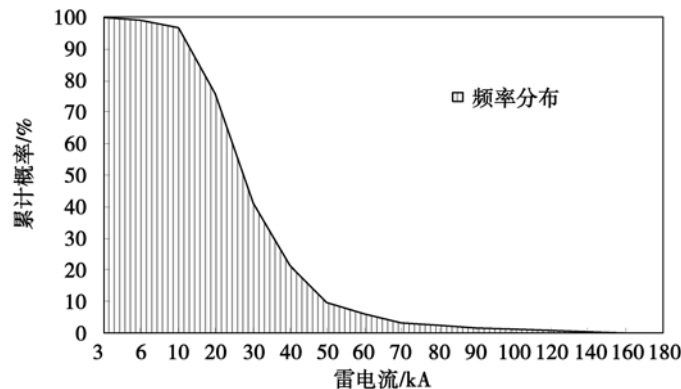


图6 文昌发射场雷电流强度累积概率

Fig. 6 Accumulative frequency of lightning current strength in Wenchang Rocket Launching Site

2.5 发射场雷暴的日变化特征

地闪频数空间分布和强度特征对发射场的雷电防护设计和火箭发射装置的布置,具有一定的参考价值,但如何选择发射时间窗就要考虑地闪的日变化特征。利用二年的闪电观测资料以发射场地源为中心 20 km 为半径逐时计算地闪次数,给出地闪的日变化特征(图7)。从图中看出,文昌发射场一天中地闪的发生有两个高峰时段,一个出现在凌晨5点到6点,另一个时段出现在14点到18点,发射时间窗要尽量避开这两个时

段,另外有两个时段雷暴活动较弱,分别在7点到11点和19点至23点,午后15点左右是雷暴活动最频繁的时间段,这段时间的夏天一般都伴随着强对流天气的发生,雷暴活动非常强烈,是最不适合火箭发射的时间窗。

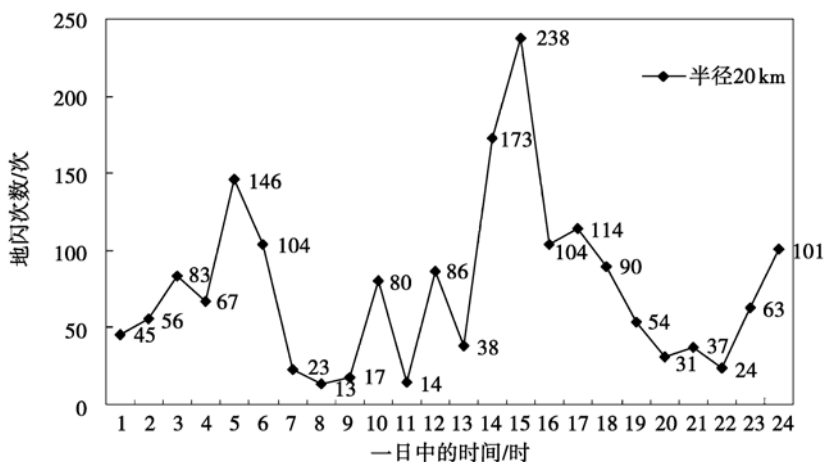


图 7 文昌发射场地闪日变化

Fig. 7 Daily change of lightning number in Wenchang Rocket Launching Site

3 小结

本文利用海南 18 个气象台站的人工观测雷暴资料和海南闪电定位网的观测资料,分析了海南文昌火箭发射场的雷暴特征和雷电环境,得到以下结果:

(1) 海南岛是强雷暴区,所有市县的年平均雷暴日数都超过 60 d,一半的市县超过 100 d,发射场所在的文昌市年平均雷暴日数较强为 91.3 d,海南岛的中部和北部雷暴活动较强,西部、东部和南部的近海地区雷暴活动偏弱,文昌发射场应处在北部较强的雷暴区。

(2) 采用 Kriging 方法拟合的文昌火箭发射场 T_d 年变化特征是 1997 年出现峰值,1982 年以前数值较高,之后逐渐减小,2006 年最低; T_d 月变化特征是发射场一年中各月都有雷暴发生,较多的月份出现在 8 月和 5、6 月,都在 15 d 以上,一年中 4 - 10 月为雷暴高发期。

(3) 发射场 40 km 范围内的地闪频数值在 4.5(次·a⁻¹)至 47.5(次·a⁻¹)之间,空间分布为北部、西北部和西部区域地闪频数相对较高,龙楼以东的铜鼓岭区域有一个相对高值区,东部、东南部和南部区域地闪频数较小;以发射场地源为中心 20 km 为半径的雷电流强度计算结果是有 79% 的雷电流强度小于 40 kA,而只有 5.9% 的雷电流强度大于 60 kA,大部分雷电流强度都是小于 40 kA 的;文昌发射场一天中闪电的发生有两个高峰时段,一个出现在凌晨 5 时到 6 时,另一个时段出现在 14 时到 18 时,另外有两个时段闪电活动较弱,分别在 7 时到 11 时和 19 时至 23 时,午后 15 时左右是闪电活动最频繁的时间段,是最不适合火箭发射的时间段。

文昌火箭发射场未来将采用新一代运载火箭完成发射任务,新一代运载火箭的技术继承性普遍很高,但仍然使用了一些没有得到验证的新技术,其可靠性需要发射多次后才能最后确定,此外,新一代运载火箭运载的是质量更大、价值更高的有效载荷^[15],任何风险导致发射失败都是不可估量的,雷暴对航天发射有着至关重要的影响,分析研究火箭发射场雷电环境只是做了前期工作,今后还需要通过布设大气电场仪等观测设备,进一步获得闪电重要物理量特征资料,重点加强发射场区雷暴监测、预警的气象保障工作。

致谢:感谢中国气象科学研究院张义军和吕伟涛研究员为本文提出了修改指导意见。

参考文献:

[1] 王义耕,陈渭民,刘洁. TRMM 卫星观测到的华南地区的闪电时空分布特征[J]. 热带气象学报,2009,25(2):227-232.
WANG Yigeng, CHEN Weimin, LIU Jie. Temporal and spatial distributions of lightning activity in south of China from TRMM satellite observation [J]. Journal of Tropical Meteorology, 2009, 25(2): 227-232. (in Chinese)

[2] 宋树培. GJB1804《运载火箭雷电防护》简介[J]. 航天标准化,1997(2):9-11.

- SONG Shupe. GJB1804《Lightning protections of carrier rocket》introduction [J]. Aerospace Standardization, 1997(2): 9-11. (in Chinese)
- [3] 刘晓东,冯旭宇,卢士庆,等. 神州飞船发射与回收场雷暴活动特征[J]. 内蒙古大学学报, 2010, 41(4): 475-479.
LIU Xiaodong, FENG Xuyu, LU Shiqing, et al. Characteristics of thunderstorm activity at the launch site and recovery field of Shenzhou spacecraft [J]. Journal of Inner Mongolia University, 2010, 41(4): 475-479. (in Chinese)
- [4] 吴孟恒,田艳婷,崔海华,等. 2003-2008年河北省雷电灾害特征统计分析[J]. 自然灾害学报, 2010, 19(1): 21-25.
WU Mengheng, TIAN Yanting, CUI Haihua, et al. Statistical analysis of characteristics of lightning disaster in Hebei 2003 to 2008 [J]. Journal of Natural Disasters, 2010, 19(1): 21-25. (in Chinese)
- [5] 杨世刚,郝孝智,任晓霞,等. 山西省2006年雷电灾害成因分析及应对措施[J]. 自然灾害学报, 2008, 17(2): 117-120.
YANG Shigang, HAO Xiaozhi, REN Xiaoxia, et al. Cause analysis and counter measures against lightning disaster in Shanxi Province in 2006 [J]. Journal of Natural Disasters, 2008, 17(2): 117-120. (in Chinese)
- [6] 覃卫坚,寿绍文,王咏青,等. 广西雷暴分布特征及灾害成因分析[J]. 自然灾害学报, 2009, 18(2): 131-138.
QIN Weijian, SHOU Shaowen, WANG Yongqing, et al. Analysis of distribution characteristics and damage causes of thunderstorm in Guangxi [J]. Journal of Natural Disasters, 2009, 18(2): 131-138. (in Chinese)
- [7] 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): 729-735.
DAI Jianhua, QIN Hong, ZHENG Jie. Analysis of lightning activity over the Yangtze river delta using TRMM/LIS observations [J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2005, 16(6): 729-735. (in Chinese)
- [8] 周筠璐,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): 1309-1314.
ZHOU Yunjun, 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): 1309-1314. (in Chinese)
- [9] ZHANG Yijun, MA Ming, LU Weitao, et al. Review on climate characteristics of lightning activity [J]. Acta Meteorologica Sinica, 2010, 24(2): 137-138.
- [10] 张腾飞,尹丽云,许迎杰,等. 2007年5-8月云南省雷电活动特点和致灾因子分析[J]. 灾害学, 2009, 24(1): 73-79.
ZHANG Tengfei, YIN Liyun, XU Yingjie, et al. Analysis of characteristics and causes of lightning activity in May to August of 2007 in Yunnan [J]. Journal of Catastrophology, 2009, 24(1): 73-79. (in Chinese)
- [11] 钟幼军,曹铁英,宫延平,等. 黑龙江雷电活动气候特征分析[J]. 自然灾害学报, 2007, 16(5): 79-83.
ZHONG Youjun, CAO Tiejing, GONG Yanping, et al. Analysis of climatic character of lightning activity in Heilongjiang Province [J]. Journal of Natural Disasters, 2007, 16(5): 79-83. (in Chinese)
- [12] Rana A M, Andreas P R. An Empirical comparison of kriging methods for nonlinear spatial point prediction [J]. Mathematical Geology, 2002, 34(4): 365-386.
- [13] 刘峰. 应用Kriging算法实现气象资料空间内插[J]. 气象科技, 2004, 32(2): 110-115.
LIU Feng. Application of kriging algorithm to spatial interpolation of weather data [J]. Meteorological Science and Technology, 2004, 32(2): 110-115. (in Chinese)
- [14] 郭冬艳,辛吉武,吴胜安,等. 海南雷暴气候特征及大气环流背景分析[J]. 气象科技, 2008, 36(4): 503-508.
GUO Dongyan, XIN Jiwu, WU Shengan, et al. Climatic changes related to thunderstorm days in Hainan and analysis of atmospheric circulation background [J]. Meteorological Science and Technology, 2008, 36(4): 503-508. (in Chinese)
- [15] 张健壮. 航天危险分析[J]. 导弹与航天运载技术, 2006, 281(1): 20-24.
ZHANG Jianzhuang. Space launch risk analysis [J]. Missile and Space Vehicle, 2006, 281(1): 20-24. (in Chinese)