

辽宁省雷电易发区及预警应对等级划分

马虹旭^{1,2} 袁湘玲^{3*} 张凯² 姜禹⁴

(1 中国气象局沈阳大气环境研究所, 沈阳 110166; 2 辽宁省防雷技术服务中心, 沈阳 110166;
3 黑龙江齐齐哈尔市气象局, 齐齐哈尔 161006; 4 东软集团股份有限公司, 沈阳 110179)

摘要 基于辽宁省 1981—2010 年雷暴日数据、2012—2019 年闪电定位数据和 2015 年公里网格 GDP 及人口数据, 采用 AHP 法、风险矩阵法和 ArcGIS 空间分析方法, 分析了辽宁省闪电活动时空特征, 得出 10 km×10 km 网格区域雷电易发等级及应对等级。结果表明: 辽宁省 2012—2019 年闪电活动日数总体呈下降趋势。闪电活动主要发生在 6—9 月, 总闪和负闪最大值出现在 8 月, 正闪活动最大值出现在 6 月; 辽宁地区年平均雷暴日数的空间分布趋势呈现北部比南部多, 东西部比中部多, 从地形地貌上看, 辽宁地区雷暴日数空间分布符合山地大于平原, 平原大于沿海地区的分布规律。辽宁地区雷电易发区域呈自中部丘陵和平原地区向东西部山区逐渐递减的分布趋势, 雷电易发区域与经济发达区大体重叠, 需引起重视。

关键词 雷电易发区划; 应对等级; 空间分布

中图分类号: P427.32 **DOI:** 10.19517/j.1671-6345.20200330 **文献标识码:** A

引言

作为最严重的 10 种自然灾害之一, 雷电是发生频率高, 突发性强的一种瞬态天气现象, 常伴有闪电、雷雨、大风、冰雹等极端灾害性天气。雷电发生的随机性及其成灾的迅速性使得电力、航空航天、化工、保险业、建筑业、旅游景区等各部门对雷电监测和预警的要求越来越大、越来越高。辽宁省地处亚欧大陆东岸, 属大陆季风气候, 具有中纬度西风带天气特色。主要气候特点是: 四季分明, 春秋季短, 雨热同季, 寒冷期长, 日照丰富, 东湿西干, 平原风大等。辽宁春季回暖迅速, 风大少雨; 夏季雨量充沛, 高温潮湿, 秋季气温速降, 雨量骤减; 冬季寒冷漫长, 降水稀少。辽宁的雷暴期, 辽西山区稍短, 在 160~170 d 之间; 东南部地区和营口地区较长, 可达 180 d 以上, 丹东达 196 d; 其他地区在 170~180 d 之间。最长雷暴期, 大部分地区超过 200 d, 其中鞍山、本溪、丹东及复州城等地雷暴期可达 250 d^[1]。根据《建筑物电子信息系统防雷技术规范》^[2]

(GB50343—2012) 中的规定, 通过对辽宁省年平均雷暴日的统计表明: 辽宁省属中雷区。

由于雷电灾害的随机性和瞬时性, 以及雷电资料的不完备性, 使得系统性的雷电灾害风险区划研究亟待开展。长期以来, 国内外不少专家和学者致力于雷电灾害研究, 如张婧等^[3] 通过对河北省 1998—2007 年的气象观测资料进行统计分析, 利用 GIS 技术、结合自然灾害风险指数方法及洪涝灾害风险评价模型, 基于本省自然环境、经济指标等要素, 绘制河北省县级洪涝灾害风险区划图。殷娴等^[4] 对江苏省 13 个地级市的雷电灾害分布特征进行分析, 研究发现区域雷灾易损性取决于区域自然条件对雷电磁场环境变化的敏感性, 同时还与区域社会体系对雷电灾害的承受能力息息相关。目前基于自然灾害系统理论^[5], 开展雷电灾害风险区划研究是许多学者关注的热点^[6-8], 随着地理信息数据在气象领域广泛的应用, 在开展气象灾害风险区划时结合 GIS 技术, 将有助于提高气象灾害风险区划精度。

<http://www.qxkj.net.cn> 气象科技

中国气象局沈阳大气环境研究所和东北冷涡研究重点开放实验室联合开放基金课题资助

作者简介: 马虹旭, 女, 1981 年生, 硕士, 工程师, 主要从事雷电灾害防御工作, Email: 33125807@qq.com

收稿日期: 2020 年 8 月 7 日; 定稿日期: 2020 年 12 月 14 日

* 通信作者, Email: qqhryxl@aliyun.com

现阶段辽宁省利用闪电定位仪数据对雷电易发区域的划分研究较为欠缺,本文基于自然灾害系统理论和自然灾害风险评估理论,利用辽宁地区 1981—2010 年雷暴日资料、2012—2019 年闪电定位仪资料,结合 2015 年公里网格 GDP 及人口数据,分析辽宁省雷电灾害孕灾环境、雷电活动时空分布特征及辽宁省潜在的雷电易损性。利用 ArcGIS 空间分析方法,将地闪密度中的数据进行栅格化处理,利用插值分析中的反距离权重法进行平均运行,获得内插单元,编制出辽宁省雷电易发区域及防范等级划分的示意图,为加快辽宁省雷电灾害防御体系建设提供科学依据和重要参考,对政府防御雷电灾害提供决策依据。

1 资料与方法

1.1 资料来源

文中使用资料包括:2012—2019 年辽宁省闪电定位资料,来源于辽宁省气象信息中心;1981—2010 年辽宁省雷暴日数据,来源于国家气象信息中心制作的中国地面气候标准值数据集;2015 年中国 GDP 空间分布公里网格数据^[9]和中国人口空间分布公里网格数据^[10],源自中国科学院资源环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn>)。

1.2 研究方法

1.2.1 建立评价单元

建立评价单元是指对选定区域进行空间划分,形成评价分析的最小单位,这些空间单元构成了雷电易发风险评价的基本单元^[11]。在空间单元划分上,考虑到避免雷电定位误差的影响,把辽宁省所辖行政区域 $38^{\circ}43' \sim 43^{\circ}26' \text{ N}$ 、 $118^{\circ}53' \sim 125^{\circ}46' \text{ E}$,按照 $10 \text{ km} \times 10 \text{ km}$ 的尺度进行划分,划分为 1615 个空间单元,对各空间单元的闪电定位数据进行数理统计,利用 ArcGIS 软件进行空间分析。空间分析采用反距离权重法(IDW)将点插值成栅格表面,获得的像元输出值限定在插值时用到的值范围之内。由于反距离权重法是加权平均距离,因此其平均值不可能大于最大输出或小于最小输入。由于样本足够密集,采用反距离权重法会获得最佳结果,用公式表达为:

$$\hat{Z}(X_0, Y_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(X_i, Y_i) \quad (1)$$

式中, $\hat{Z}(X_0, Y_0)$ 为 (X_0, Y_0) 点的预测值, n 代表计

算时要使用的预测点周围样点的数量; λ_i 代表在预测计算过程中需要使用的各个样点的权重,该数值与样点和预测点之间距离成反比; $Z(X_i, Y_i)$ 是在 (X_i, Y_i) 处获得的测量值。

1.2.2 雷电易发区的划分方法

雷电易发等级代表评价单元发生雷电并造成危害的可能性的。本研究选取雷暴日数、闪电密度和雷电流强度做为雷电易发风险评价指标,采用 AHP 方法^[12-14] 确定指标权重,构建雷电易发风险计算模型,依据雷电易发风险值,利用自然断点法进行雷电易发等级划分。选取雷电流平均幅值、绕击率和雷击率综合量化分析雷电流强度特征^[15],采用加权综合评价法^[16],建立雷电流强度分析模型。根据加权综合评价法,假设因指标量化值的不同,导致不同指标对于特定因子的影响程度存在差别,表达为下列公式:

$$V_{ij} = \sum_{i=1, j=1}^n \tau_{ij} D_{ij} \quad (2)$$

式中, V_{ij} 为评价因子的总值; D_{ij} 为因子 i, j 的指标 ($D_{ij} \geq 0$); W_{ij} 为权重值 ($0 \leq W_{ij} \leq 1$); n 为评价指标个数。雷暴日和地闪密度可反映评价单元发生雷电的可能性,雷电流强度可反映评价单元可能遭受雷电损害的危险程度,绕击率和雷击率可反映评价单元内防雷装置失效的可能性。

1.2.3 雷电风险应对等级的确定方法

雷电风险应对等级是指评价单元可能发生雷击的风险及承灾体可能受损的程度。本研究选取雷电易发风险指数、生命和经济易损指数做为雷电风险应对等级的评价指标,采用风险矩阵法建立雷电风险应对等级值计算模型,依据雷电风险应对等级值确定雷电风险应对等级。所谓的风险矩阵法是一种综合评估方法,即对可能发生的危险和危险发生后可能产生破坏影响的严重程度来进行综合评估,同时开展定性评估分析风险大小的方法。该方法的思路是对所研究的风险事件发生的可能性和破坏程度分别进行分级评分,将二者作为矩阵的行和列,二者的估计值相乘得到所研究的风险值,最终按照风险事件在矩阵中的位置做出评估。风险矩阵的基本数学模型为:

$$\begin{aligned} & \text{当 } p_i \leq p < p_{i+1} \text{ 且 } c_j \leq c < c_{j+1} \text{ 时} \\ & R = f(p, c) = [R_{ij}] \end{aligned} \quad (3)$$

式中, R_{ij} 表示风险矩阵中对应风险概率第 i 级和

险后果第 j 级的风险等级, p_i 与 c_j 分别表示风险概率第 i 级和风险后果第 j 级的下限, p_{i+1} 与 c_{j+1} 分别为相对应的上限。常见的实现形式是以乘法作为函数具体的实现形式。雷电风险应对等级划分模型的计算公式为:

$$R = PC \quad (4)$$

式中, R 为雷电灾害风险值; P 为雷电易发风险指数; C 为生命和经济易损指数。

2 结果分析

2.1 闪电活动时间变化

2.1.1 闪电活动年际变化

有研究人员认为,闪电定位系统探测的小幅值正地闪可能来源于环境电场、云闪的干扰,或是由于闪电定位仪的硬件系统导致探测小幅值正地闪的效果不理想,提出剔除这部分数据,以消除探测误差^[17]。根据 2012—2019 年辽宁省闪电定位数据,总计有 841,875 个闪电记录,结合地闪资料在不同地区的分布特征及 IEEE 工业组文件规定回击电流应用范围定义^[18],本文剔除了其中雷电流幅值绝对值小于 2 kA 的 5,492 个记录和大于 300 kA 的 2,847 个记录,本研究使用的样本总数为 833,536 个。其中正闪电数为 120,955 个,占样本总数的 14.5%;负闪电数为 712,581 个,占样本总数的 85.5%。采用数理统计方法得出 2012—2019 年辽宁省闪电活动年际变化特征,并绘制于图 1 中。从图 1 中可以看出,总闪电和负闪电次数年际变化趋势基本一致,均呈明显下降趋势,正闪电年际变化不明显。总闪电数最大值出现在 2013 年,为 161,191 次,最小值出现在 2018 年,为 50,313 次;负闪电数最大值出现在 2013 年,为 151,935 次,最小值出现在 2016 年,为 35,433 次;正闪电数最大值出现在 2016 年,为 21,267 次,最小值出现在 2013 年,为 9,256 次。2013—2016 年,总闪和负闪呈现逐年下降的趋势,2017 年闪电活动有所增加,但 2012—2019 年,总体上呈现逐年下降的趋势,总闪与负闪年际变化趋势一致,正闪年际变化不明显。高继卿等^[19]通过对北方地区降水资料的分析,发现最近 30 a 辽宁地区半干旱面积显著扩大,半湿润区面积明显缩小,在过去的 50 a,小雨降水频次增加,大雨及暴雨极少出现,近 10 a 辽宁省年平均气温是在波动中呈上升趋势,可见在全球气候变暖的大背景下,辽宁地区冷空气的

势力较弱,强对流天气出现的频次减少,因此辽宁省的闪电活动呈逐年递减的趋势。

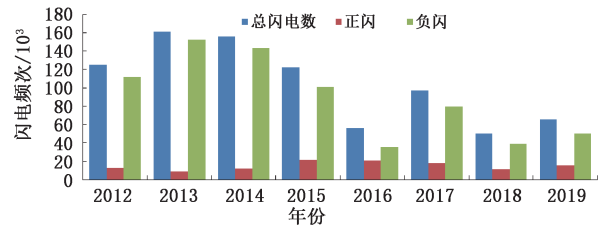


图1 2012—2019年辽宁省闪电活动年际变化

2.1.2 闪电活动月际变化特征

图 2 为 2012—2019 年辽宁省闪电活动月际变化。从中可以看出,辽宁省闪电活动主要发生在 6—9 月,占总样本的 89.3%,正闪和负闪分别占其总样本的 72.9%、91.9%。总闪和负闪最大值出现在 8 月,分别占其总样本的 36.8%和 40.9%;正闪活动最大值出现在 6 月,占正闪总样本的 39.4%。这种月际变化是由辽宁的气候特点决定的,5—6 月辽宁地区西南暖湿气流开始活跃,受东北冷涡影响,不稳定天气形势增多,冷暖空气交汇,水汽、热力、动力条件均有利于不稳定能量聚集,形成强对流天气。7 月平均气温最高,7 月下旬开始,太平洋副热带高压逐步北跳,将南部暖湿气流输送至东北地区,当有中小尺度天气系统活动,配合以辽宁东西部山区地形抬升作用,地面场发生畸变,极易形成局地强雷暴天气^[20],因此雷暴出现在夏季的频率最多。春季,随着气温逐渐回升,冷空气势力逐渐减弱,暖空气日渐活跃;秋季恰恰相反;冬季冷空气占主要地位,因此几乎没有雷暴

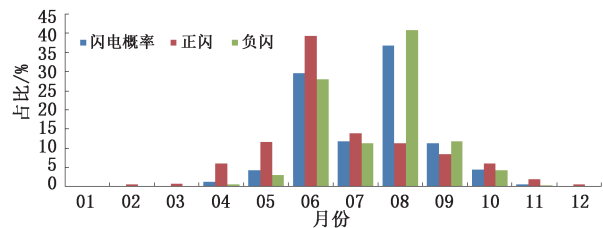


图2 2012—2019年辽宁省闪电活动占比(占总样本)月际变化

2.2 雷电流幅值分布概率

采用数理统计方法分析 2012—2019 年辽宁省雷电流幅值的分布概率,并将结果绘制于图 3 中。从图 3 中可以看出,负闪雷电流幅值主要分布在 15~40 kA,占其总样本的 71.4%;正闪分布较为分

散,大于 200 kA 的闪电主要是正闪。在北方地区,正电荷区广泛地分布于雷暴云底部,雷暴云大多呈现三极性结构,即上下两端为正电荷,中间为负电荷^[21],很多学者通过大量的研究发现,在雷暴云中,负电荷区的电荷密度通常比正电荷区大一个量级^[22],且负闪的回击数往往高于正闪。

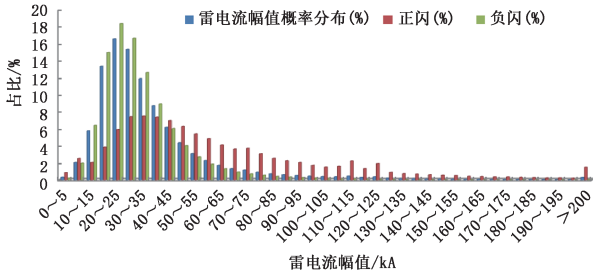


图 3 2012—2019 年辽宁省雷电流幅值概率分布

2.3 闪电空间分布

2.3.1 雷暴日数空间分布

图 4a 中基于 1981—2010 年辽宁省雷暴日数据,得出的辽宁省年平均雷暴日数空间分布图可以看出:朝阳地区、阜新市彰武县、锦州市义县、铁岭地区、抚顺地区、本溪地区西部、辽阳地区东部最多,在 30~40 d 之间,属于中雷区。大连地区、丹东地区、营口市、盘锦地区最少,小于 25 d,属于少雷区。

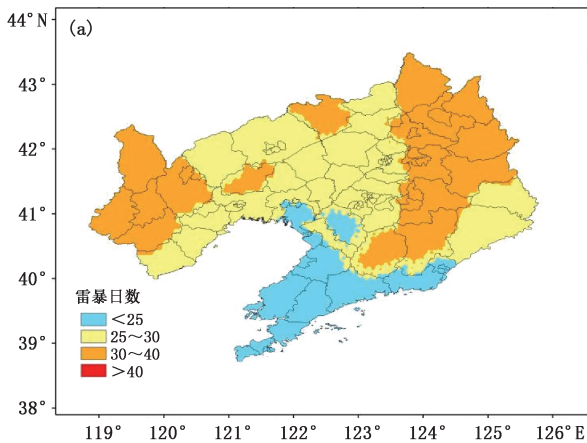


图 4b 中基于 2012—2019 年辽宁省闪电定位资料,得出的辽宁省年平均雷暴日数空间分布图可以看出:朝阳市建平县、阜新地区西部、铁岭地区西部、抚顺地区、丹东地区最多,大于 40 d,属于多雷区。朝阳市区、锦州市区、盘锦地区、大连地区南部、辽阳地区北部、鞍山地区南部、铁岭地区中部、丹东地区南部最少,小于 25 d,属于少雷区。其余地区在 25~40 d 之间,属于中雷区。

两种资料得出的辽宁地区年平均雷暴日空间分布呈现出从中部丘陵、平原及沿海地区向东西部山区逐渐递增的特征。丘陵地区和山区的地形,对中尺度雷暴系统有动力抬升作用,白天太阳辐射向空中反射量少于平地,热量积累后受地形阻挡,散逸的能力也低于平原^[23],可见辽宁地区雷暴日数空间分布符合山地大于平原,平原大于沿海地区的分布规律。两种资料得出的结果在量级上有差别,分析原因主要是由于人工观测雷暴日是通过人耳监听,主观性较强,雷声大小、周围环境噪声等都会影响观测员的判断,观测范围约为 15~20 km,而闪电定位仪单站探测范围平均为 300 km,远大于人工观测,探测精度更高,因此闪电定位系统监测值远远大于人工观测值^[24]。

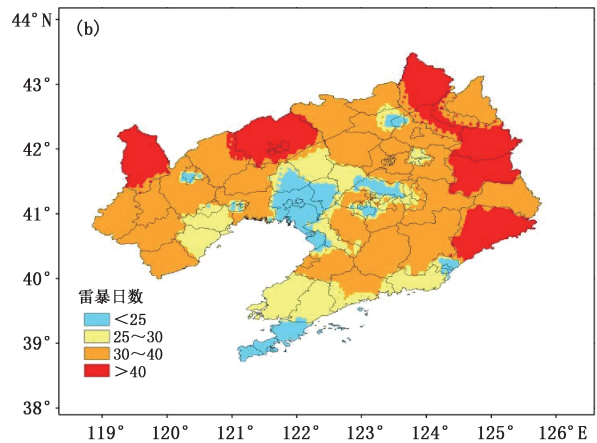


图 4 辽宁省年平均雷暴日数空间分布:(a)基于 1981—2010 年雷暴日数据,(b)基于 2012—2019 年闪电定位数据

2.3.2 闪电密度空间分布特征

本文利用 ArcGIS 空间分析方法,将闪电密度中的数据进行栅格化处理,利用插值分析中的反距离权重法进行平均运行,获得内插单元,绘制 2012—2019 辽宁省闪电密度空间分布(图 5)。可以看出闪电密度最高值区位于丹东凤城北部,为

0.884~1.175 次·km⁻²·a⁻¹。次高值区位于铁岭南、抚顺北部、鞍山中部,为 0.592~0.884 次·km⁻²·a⁻¹。低值区位于东西部山区及南部沿海地区,密度值小于 0.301 次·km⁻²·a⁻¹。通过对高值区的地形分析后认为,山区的迎风坡对雷暴云有强迫抬升作用,迎风坡前和山谷底部的空气受热不均匀,容易形成对

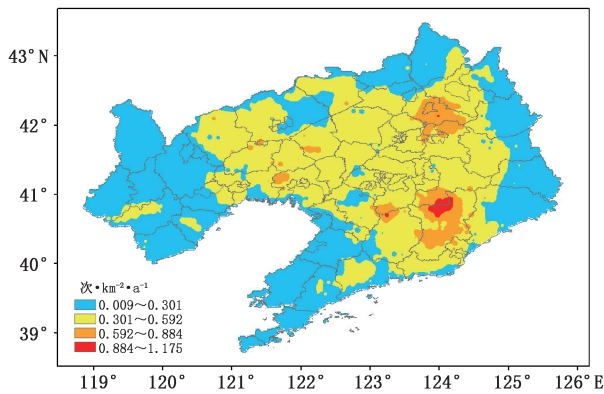


图 5 2012—2019 年辽宁省闪电密度空间分布

流,导致闪电频发。

2.3.3 雷电流平均幅值空间分布特征

从 2012—2019 年辽宁省雷电流平均幅值分布特征(图 6),可以看出,高值区位于朝阳市区、建平县及大连旅顺口区,为 57.9~69.9 kA;低值区分布于锦州大部、鞍山西北部及东南部、铁岭南部、抚顺西部及南部、本溪南部、丹东西部,为 21.7~33.8 kA;其他区域雷电流平均幅值介于 33.8~57.9 kA。雷电流平均幅值空间分布与闪电密度空间分布特征差异较大,这与不同强度的雷暴对总闪贡献的差别有关。在雷暴过程中,弱雷暴发生次数最多,但是产生的闪电占比较少,强雷暴过程发生次数虽少,但是产生闪电的效率,危害大。雷电流平均幅值空间分布与局地地形一致,具有较明显的地理特征。

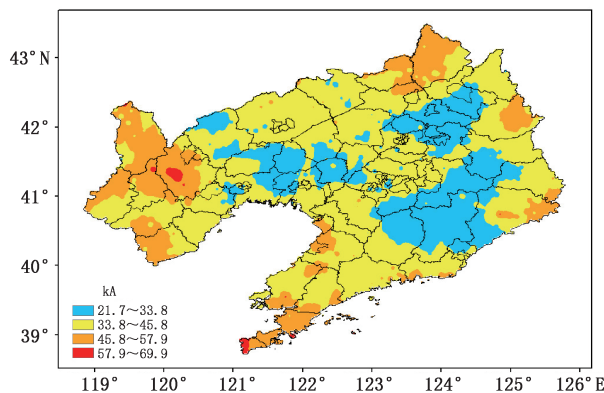


图 6 2012—2019 年辽宁省雷电流平均幅值空间分布

2.4 雷电易发区划

采用加权综合评价法将辽宁省雷电易发区划分为 4 个等级:红色—雷电高风险区,橙色—雷电中高风险区,黄色—雷电中风险区,蓝色—雷电低风险区

(图 7)。结果表明:辽宁地区雷电易发区域呈现以沈阳市区—辽阳市区—鞍山市区及海城市—营口市—盘锦市—大连市区及瓦房店市—普兰店市—一线(东北—西南向)为轴,自中部丘陵和平原地区向东西部山区逐渐递减的分布趋势,雷电易发区域与经济发达区大体重叠。经济发达区人口聚居、交通繁华,是防雷减灾的重点区域。沈阳及大连中心城区为雷电高风险区;沈阳、抚顺、本溪、辽阳、盘锦、鞍山、营口、大连等地市区为雷电中高风险区,铁岭北部、本溪东部、丹东北部、朝阳西部、葫芦岛南部为雷电低风险区,其余地区为雷电中风险区。

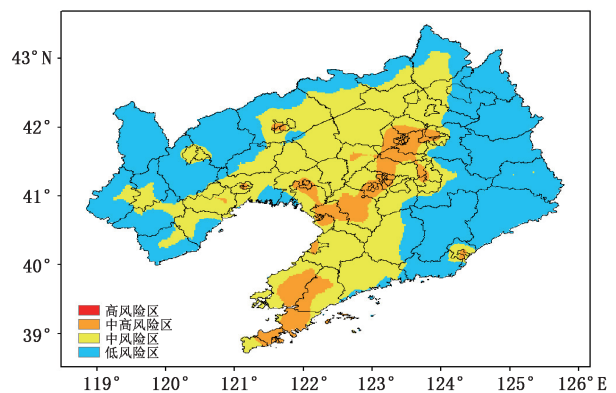


图 7 辽宁省雷电易发区分布

2.5 雷电风险应对等级

选取雷电易发风险指数、生命和经济易损指数做为雷电风险应对等级的评价指标,通过风险矩阵法来建立雷电风险应对等级值计算模型,依据雷电风险应对等级值确定雷电风险应对等级(图 8)。生命和经济易损指数表征承载体的暴露度,即可能受到危险因素威胁的人员和财产等,一个地区暴露于各种危险因素的人员和财产越多,其受灾财产价值密度越高,可能遭受潜在的损失就越大,灾害风险也越大^[25]。根据中国科学院资源环境科学数据中心 2015 年中国 GDP 空间分布公里网格数据和中国人人口空间分布公里网格数据显示,2015 年辽宁省生产总值(GDP)28700 亿元,位居前 3 位的是大连、沈阳、鞍山,分别为 7700 亿元、7280 亿元和 2326 亿元。从人均 GDP 看,大连、盘锦、沈阳位居前 3 位,铁岭、葫芦岛、朝阳位居后 3 位。人口方面,2015 年,辽宁省常住人口 4382.4 万人,其中城镇人口 2951.5464 万人,乡村人口 1430.8536 万人,城镇化率 67.35%。常住人口沈阳、大连、鞍山位居前 3

位,阜新、本溪、盘锦位于后 3 位。

从图 8 中可以看出,当雷电灾害风险值为 1,2 时,应对等级最高为一级,用红色表示;雷电灾害风险值为 3,4 时,应对等级为二级,用橙色表示;雷电灾害风险值为 6,8,9 时,应对等级为三级,用黄色表示;雷电灾害风险值为 12,16 时,应对等级最低为四级,用蓝色表示。结果显示:沈阳、抚顺、辽阳、盘锦、大连等地市区雷电风险应对等级为二级;铁岭北部、本溪东部、丹东北部、朝阳西部、葫芦岛南部雷电应对等级为四级;其余地区雷电风险应对等级为三级。由于雷电活动极易与其他气象灾害混杂,因此雷电风险等级不仅与闪电活动的频繁程度及空间分布有关,而且与下垫面的承灾体分布密切相关^[26-28]。经济发达区由于人口集中以及大量弱电设备的使用,遭受雷击的风险较大,一旦遭受雷击后的损失较严重。东西部山区的农村人口,由于所处的地形及气候环境较复杂,基础设施相对落后,雷电防护措施及防护意识相对薄弱,也容易遭受雷电灾害。

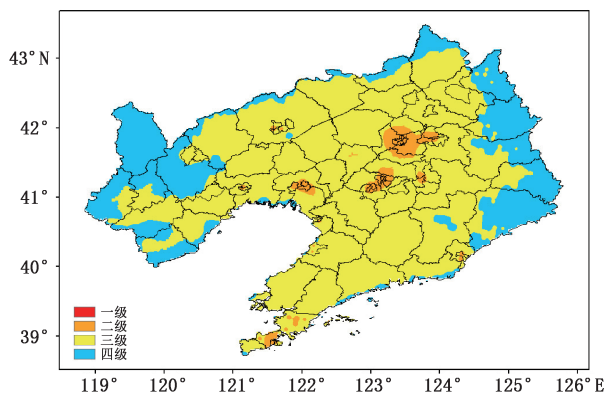


图 8 辽宁省雷电风险应对等级分布

3 结论与讨论

(1)2012—2019 年辽宁省闪电活动日数总体呈下降趋势。闪电活动主要发生在 6—9 月,总闪和负闪最大日数值出现在 8 月,正闪活动最大值出现在 6 月。这种月变化是由辽宁的气候特点决定的,5—6 月辽宁地区西南暖湿气流开始活跃,受东北冷涡影响,不稳定天气形势增多。7 月下旬开始,太平洋副热带高压逐步北跳,将南部暖湿气流输送至东北地区,加之辽宁东西部山区地形抬升作用,8 月容易形成雷暴天气。

(2)辽宁地区负闪雷电流幅值主要分布为 15~

40 kA,占其总样本的 71.4%;正闪分布较为分散,大于 200 kA 的闪电主要是正闪。

(3)辽宁地区年平均雷暴日数的空间分布趋势是,北部比南部多,东、西部比中部多,从地形地貌上看,辽宁地区雷暴日数空间分布符合山地大于平原,平原大于沿海地区的分布规律。

(4)辽宁地区雷电易发区域呈现自中部丘陵和平原地区向东西部山区逐渐递减的分布趋势,雷电易发区域与经济发达区大体重叠,值得引起重视。经济发达区与人口聚居、交通便利等条件相关,是防雷减灾的重点区域。

(5)将辽宁地区划分为雷电高风险区、雷电中高风险区、雷电中风险区、雷电低风险区。建议分级制定防雷安全管理制度,建立雷电灾害应急预案和防雷巡检制度,定期开展防雷装置安全性能检测,及时上报雷击灾害事故,有条件的单位应关注雷电预警信息,根据预警信息及时合理安排生产和工作。

参考文献

- [1] 辽宁省地方志编纂委员会办公室主编,辽宁省志气象志[M]. 沈阳:辽宁民族出版社,2002.
- [2] 建筑物电子信息系统防雷技术规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2012.
- [3] 张婧,郝立生,许晓光. 基于 GIS 技术的河北省洪涝灾害风险区划与分析[J]. 灾害学,2009,24(2):51-56.
- [4] 殷娴,肖稳安,冯民学,等. 区域雷灾分布特征及易损度区划[J]. 气象科技,2009,37(2):216-220.
- [5] 黄崇福. 主要气象灾害风险评价与管理的数量化方法及其应用[M]. 北京:北京师范大学出版社,2007:20-58.
- [6] 郭虎,熊亚军. 北京市雷电灾害易损性分析、评估及易损度区划[J]. 应用气象学报,2008,19(1):35-40.
- [7] 李彩莲,赵西社,赵东,等. 陕西省雷电灾害易损性分析、评估及易损度区划[J]. 灾害学,2008,23(4):49-53.
- [8] 王惠,邓勇,尹丽云,等. 云南省雷电灾害易损性分析及区划[J]. 气象,2007,33(12):83-87.
- [9] 徐新良. 中国 GDP 空间分布公里网格数据集[DB/OL]. (2017-12-11)[2020-08-07]. <http://www.resdc.cn/>.
- [10] 徐新良. 中国人口空间分布公里网格数据集[DB/OL]. (2017-12-11)[2020-08-07]. <http://www.resdc.cn/>.
- [11] 薛丰昌. GIS MCE 技术在农业气象灾害风险评价中的应用[J]. 气象,2012,38(9):1140-1144.
- [12] Saaty T. The Analytical Hierarchy Process [M]. New York: McGraw-Hill,1980.
- [13] 樊运晓,罗云,陈庆寿. 区域承灾体脆弱性综合评价指标权重的确定[J]. 灾害学,2001,16(1):85-87.
- [14] 樊运晓,罗云,陈庆寿. 承灾体脆弱性评价指标中的量化方法

- 探讨[J]. 灾害学, 2000, 15(2): 78-81.
- [15] 袁湘玲, 周倩, 王振会, 等. 雷电灾害风险分级方法研究[J]. 灾害学, 2017, 32(1): 26-31.
- [16] 陶菊春, 吴建民. 综合加权评分法的综合权重确定新探[J]. 系统工程理论与实践, 2001, 21(8): 43-48.
- [17] 李国樑, 李俊, 李享, 等. 雷电资料分析处理系统的设计与应用[J]. 气象科技, 2020, 48(3): 355-361.
- [18] 程向阳, 陶寅, 邱阳阳. 安徽省雷电易发区域划分[J]. 气象科技, 2018, 46(4): 785-791.
- [19] 高继卿, 杨晓光, 董朝阳, 等. 气候变化背景下中国北方干湿区降水资源变化特征分析[J]. 农业工程学报, 2015, 31(12): 99-110.
- [20] 孙丽, 于淑琴, 李岚, 等. 辽宁省雷暴日数的时空变化特征[J]. 气象与环境学报, 2010, 26(1): 59-53.
- [21] 张敏锋, 刘欣生, 张义军, 等. 广东地区雷电活动的气候分布特征[J]. 热带气象学报, 2000, 16(1): 46-53.
- [22] 刘欣生, 郭昌明, 王才伟, 等. 闪电引起的地面电场变化特征及雷暴云下部的正电荷层[J]. 气象学报, 1987, 45(4): 500-504.
- [23] 冯民学, 焦雪, 韦海容, 等. 江苏省雷电分布特征分析[J]. 气象科学, 2009, 29(2): 246-251.
- [24] 李家启, 汪志辉, 任艳, 等. 闪电定位系统与人工观测雷电日参数对比分析[J]. 气象科技, 2012, 40(1): 132-136.
- [25] 张继权, 冈田宪夫, 多多纳裕一. 综合自然灾害风险管理[J]. 城市与减灾, 2005, (2): 2-5.
- [26] 吴安坤, 田鹏举, 黄天福, 等. 基于人口/GDP数据空间化的雷电灾害风险评估[J]. 气象科技, 2018, 46(5): 1026-1031.
- [27] 贺姗, 肖稳安, 王学良, 等. 雷电强度客观分级方法探讨[J]. 气象科技, 2018, 46(6): 1291-1296.
- [28] 王敏, 孔尚成, 王秀英. 青海东部地区雷电灾害易损性分析与区划[J]. 气象科技, 2018, 46(2): 412-417.

Classification of Response Levels in Lightning-Prone Areas in Liaoning Province

MA Hongxu^{1,2} YUAN Xiangling³ ZHANG Kai² JIANG Yu⁴

(1 Institute of Atmospheric Environment, China Meteorological Administration, Shenyang 110166;

2 Service Center of Lightning Protection Technology in Liaoning Province, Shenyang 110166;

3 Qiqihar Meteorological Service, Heilongjiang, Qiqihar 161006; 4 Neusoft Group Co., Ltd, Liaoning, Shenyang 110179)

Abstract: Based on the data of thunderstorm days from 1981 to 2010, lightning location from 2012 to 2019, and GDP of the kilometer grid and population in 2015 in Liaoning Province, using the AHP method, risk matrix method and ArcGIS spatial analysis method, the temporal and spatial characteristics of lightning activities in Liaoning Province are analyzed, and the lightning susceptibility level and response level of the 10 km×1 km grid area are obtained. The results indicate that the number of days of lightning activity showed an overall downward trend from 2012 to 2019 in Liaoning Province. Lightning activities mainly occurred from June to September. The maximum total and negative lightning activities appeared in August, and the maximum positive lightning activities appeared in June. The spatial distribution trend of the annual average number of thunderstorm days in Liaoning shows that there were more thunderstorm days in the northern Liaoning than in the southern, and more in the eastern and western Liaoning than in the central part. From the perspective of topography and geomorphology, in the spatial distribution, the numbers of thunderstorm days in mountain areas were greater than those in plains areas, and larger in plains than in coastal areas. The lightning-prone areas in Liaoning showed a decreasing distribution trend from the central hills and plains to the eastern and western mountainous areas. The lightning-prone areas roughly overlapped with economically developed areas, so attention should be paid.

Keywords: lightning prone zoning; response level; spatial distribution