

陈宇,王蕾,杨超,等.大连地区闪电活动时空特征分析及雷击风险度综合指数预测研究.气象科学,2017,37(6):832-838.

CHEN Yu, WANG Lei, YANG Chao, et al. Temporal-spatial distributions of lightning and prediction of lightning strike risk comprehensive index over Dalian area. Journal of the Meteorological Sciences, 2017, 37(6): 832-838.

大连地区闪电活动时空特征分析及 雷击风险度综合指数预测研究

陈宇¹ 王蕾² 杨超³ 张莹⁴

(1 中国气象局 公共气象服务中心, 北京 100081; 2 大连市气象局, 辽宁 大连 116000;

3 海峡气象开放实验室, 福建 厦门 361012; 4 中国科学院 遥感与数字地球研究所, 北京 100101)

摘要 本文利用辽宁省大连市2007年1月—2011年12月连续5 a的闪电监测数据,分析了大连地区闪电频数和强度的时空分布特征,并基于雷电频次和强度构建雷电危险度综合指数预测模型。研究表明,大连地区闪电高发期集中在6—8月,该段时间内闪电数超过全年闪电总数的80%;6、7月雷电明显集中于午后和夜间,而从8月开始雷电发生时间向凌晨时段集中,午后明显减少,夜间闪电次数略高于白天。大连地区大部分区域的平均雷击密度值低于 $10 \text{次} \cdot \text{km}^{-2}$,两个极大值中心位于长海县和普兰店市;大连地区大部分区域的平均雷击强度值介于 $5 \sim 30 \text{ kA}$ 之间,平均雷击强度的极大值中心位于主城区、金州区、瓦房店市西部及庄河市东部,最大可达 98 kA 。本文依据模糊函数法综合闪电频次与雷击电流,构造雷电危险度综合指数预测模型,并以2011年4月14日雷击灾害为例,预报雷电危险度等级为4级。该模型可对大连地区的雷电危险度等级进行预测并发布预警,更加直观、方便、高效地为公众提供气象服务信息。

关键词 ADTD; 闪电频数; 闪电强度; 时空分布; 雷电危险度综合指数

分类号: P429

doi: 10.3969/2016jms.0079

文献标识码: A

Temporal-spatial distributions of lightning and prediction of lightning strike risk comprehensive index over Dalian area

CHEN Yu¹ WANG Lei² YANG Chao³ ZHANG Ying⁴

(1 Public Meteorological Service Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China;

2 Dalian Meteorological Bureau, Liaoning Dalian 116000, China;

3 Strait Meteorological Open Laboratory, Fujian Xiamen 361012, China;

4 Institute of Remote Sensing and Digital Earth, China Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

Abstract The temporal and spatial characteristics of lightning frequency and intensity were analyzed and further lightning risk index prediction model was constructed by using the lightning data over Dalian observed from ADTD-2 lightning location system from 2007 to 2011. Results show that lightning more frequently occur from June to August, and accounts for more than 80% of the total year. The lightning significantly concentrates to occur in the afternoon and night during June and July, but mainly occurs before dawn in August. Lightning frequency at night is slightly higher than the daytime. In most area of Dalian, the mean lightning density is less than 10 km^{-2} , with the maximum of more than 200 km^{-2} in Changhai and Pulandian. The mean lightning intensity is between $5 \sim 30 \text{ kA}$, and the maximum up to 98 kA in

收稿日期(Received): 2016-09-26; 修改稿日期(Revised): 2016-12-24; 网络出版日期(Published on-line): 2017-10-18

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1243.P.20171018.1627.020.html>

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41601386); 大连市气象局自立基金项目(DLQK201313)

通信作者(Corresponding author): 张莹(ZHANG Ying). zhangying02@radi.ac.cn

main urban area including jinzhou, the west of Wafangdian, and east of Zhuanghe. In addition, the lightning risk index prediction model was established based on the frequency and intensity of lightning forecast and applied to a case study in Dalian to effectively provide the public with the direct meteorological service information.

Key words ADTD; Lightning frequency; Lightning intensity; Temporal-spatial distributions; Lightning strike risk comprehensive index

引 言

闪电是对流性天气系统发展到一定程度的产物,不仅与动力过程和微物理过程的发展密切相关,而且可在很大程度上指示强对流的发生和发展^[1]。闪电是一种天气现象,同时给人类生产生活带来巨大影响,不仅干扰通讯系统、电力设施、航空飞行器、计算机网络等的安全运行,有时还引发火灾、击毁石油化工设施,造成人畜伤亡等。据统计,全球每年因雷电造成的人员伤亡超过 1 万人,所造成的损失在 10 亿美元以上,被联合国公布为“最严重的十种自然灾害之一”^[2]。

近年来,闪电定位技术日趋丰富,国内外学者利用闪电定位资料在闪电时空分布特征方面开展了大量的研究。张义军等^[3]研究指出全球闪电密度高值区主要分布在海岸、山地、中尺度气旋多发区以及热带辐合带的辐合区内。张鸿发等^[4]利用 1998 年 1 月 1 日—2003 年 12 月 31 日 TRMM 卫星探测到 18~38°N、74~123°E 闪电资料,对中国区域年、季、日发生闪电频数和随经纬度变化,闪电密度分布和闪电气候特征进行了计算分析。李京校等^[5]分析了北京及其周边地区云闪和地闪时空分布特征。张德宏等^[6]利用 2007—2012 年的江苏省闪电定位仪资料,结合 1961—2012 年的淮安地区 6 个县(区)的雷暴日人工观测资料,分析了该地区地闪的时空分布特征。冯民学等^[7]根据江苏省 46 a 来 13 个地面观测站的雷暴日资料、4 a 的电力部门闪电定位资料以及 2 a 的气象部门闪电定位资料,分析研究了江苏省雷电活动的时空分布特点。李霞等^[8]利用苏州地区 2002—2004 年闪电定位系统监测资料,分析了该地区地闪的月变化、日变化、强度、闪电密度等特征。王学良等^[9]利用 ADTD 资料从闪电的极性分布、闪电的日变化、闪电的月变化、闪电的强度、闪电密度等方面研究了湖北地区云地闪电时空分布特征。Orville, et al^[10]对北美闪电监测网 NALDN (North American Lightning Detection Network) 的闪电定位资料进行了研究。Smith, et

al^[11]研究墨西哥湾沿岸北部 5—9 月地闪活动,发现闪电活动受地理特征和中尺度环流的影响。夏文梅等^[12]、杨超等^[13]利用多普勒天气雷达和闪电定位仪等数据,分别分析了发生在南京地区一次雷暴天气过程的雷达及闪电数据时空演变特征。温颖等^[14]利用全球闪电定位网资料、天气雷达反射率资料以及 NCEP/NCAR 的再分析格点资料,对台风“莫拉克”在中国台湾和福建两次登陆过程中的闪电活动和雷达回波特征进行了分析。目前针对雷击风险区划分析相关学者取得不少研究成果。刘垚等^[15]利用平均地闪强度、人口经济影响和自然地理要素,选取地闪密度、平均地闪强度、人口密度等 16 个雷电灾害风险评价指标,采用层次分析法计算各要素权重,从危险性、敏感性、易损性和防灾能力建立雷电灾害风险评估模型,分析雷电灾害的综合风险。扈海波等^[16]根据北京地区近 30 a 的气候站点数据空间分析,将评估区域划分成建筑物等 3 种空间类型,得到雷电灾害风险评估的主要致灾因子指标,按照概念模型方法测算了北京地区雷电灾害风险指数。

大连市属于雷暴高发区,经济比较发达,人口密度大,一旦遭受雷击,造成的经济损失和社会影响都比较大。本文通过对 ADTD-2 型闪电定位系统获取的闪电数据进行分析,从总体上认识大连市雷电的时空分布特征,利用 ArcGIS 地理信息平台对雷击区域进行特征分析,寻找影响大连市雷击风险的因子,结合各因子利用模糊综合算法对大连市的雷击风险进行区划分析。为了保证数据质量,大连市气象部门对 ADTD-2 闪电定位系统的数据进行了严格质量控制,包括剔除不完整和受损的闪电数据等。

1 研究区域及资料来源

大连市总面积 12 574 km²,主要范围在(38°34′~40°10′N,120°58′~123°31′E)(图 1)。其中,老市区面积 2 415 km²。区内山地丘陵多,平原低地少,整个地形为北高南低,北宽南窄;地势由中央轴部向东南和西北两侧的黄、渤海倾斜,面向黄海一侧长而缓。

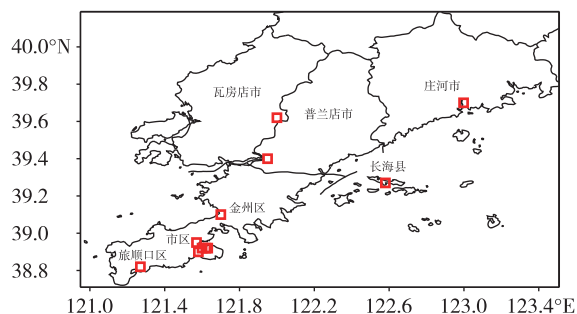


图1 大连市行政区划图
Fig.1 The administrative map of Dalian

本研究使用的数据是辽宁省气象局提供的2007年1月1日—2011年12月31日连续5 a的闪电定位资料,该资料主要包括闪电发生的时间正(负)闪数以及雷击电流强度。针对原始数据,首先进行区域筛选,将大连地区以外的数据予以剔除,进一步统计分析逐时内闪电频次以及平均累计电流强度。

2 大连地区闪电活动时空分布特征分析

2.1 闪电活动时间分布特征

图2显示了5 a内平均闪电频数的年变化。由图2可以看出,总闪和负闪的年变化趋势呈典型的单峰分布特征,这与我国全年闪电活动月份分布特征相似^[17];闪电的高发期集中在6、7和8月,该段时间内闪电数超过全年闪电总数的80%,平均每月发生37 672次左右,其中以6月最为突出,可达48 901次以上,其他各月闪电数量骤减,平均不到3 200次,负闪的年分布特征与总闪基本相同;与负闪相比,正闪发生相对较少,其年变化呈双峰分布,除了在6、7和8月与总闪保持一致的趋势之外,10月的峰值超过600次。

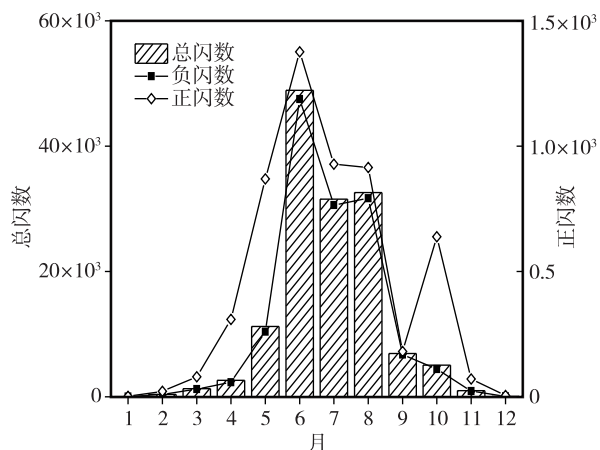


图2 2007—2011年统计月平均闪电频数
Fig.2 Monthly average lightning frequency during 2007—2011

图3为总闪频数的时间分布特征。由图3a可知,2007—2011年,总闪数的统计日变化并无明显规律。夜间略高于白天,22:00发生闪电频率显著高于其他时段。图3b显示出,6—8月,闪电数较其他月显著增加,且6、7月闪电明显集中于午后和夜间,而8月开始,闪电发生时间向凌晨时段集中,午后明显减少。

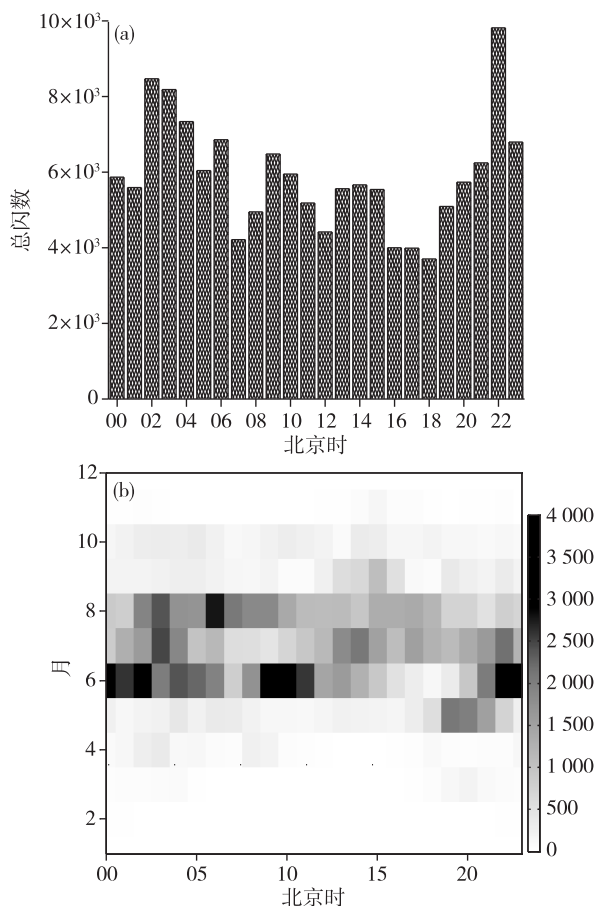


图3 2007—2011年
(a)总闪数的统计日变化;(b)每月日变化
Fig.3 (a) Daily frequency variation of total flash number and
(b) that with months during 2007—2011

2.2 闪电强度时间分布规律

取逐时的闪电强度均值为样本个例,分别统计2007年1月1日—2011年12月31日期间各月的所有闪电强度样本,制成方框一端须图,如图4所示。假定闪电强度数值呈(准)正态分布,在每个长方框的上下底,表示(准)正态分布两端占样本总数25%个例的闪电强度数值(平均,下同),方框中的黑线(该线不一定位于长方框正中间)表示占样本总数50%个例的闪电强度数值,从长方框上下边延伸出之粗黑线的端点,表示占样本总数5%个例的闪电强度数值,×表示占样本总数1%个例的闪电强度数值,最上端和最下端的短横线—表示该月所有闪电强度样本的最大值和最小值,方框中“◇”的表

示样本均值。由图 4 可以看出:(1)除 1、2、11 和 12 月外,各月均有可能出现强闪电(大于 100 kA);(2)各月闪电强度跨度范围较大,可达两个量级,其中以 7 月最为突出,最大强度可以达到 314 kA,而最小强度只有 0.7 kA,1、2、11 和 12 月闪电强度值相对比较集中;(3)超过 50% 的样本强度分布在 7~30 kA 之间,值得注意的是 1 和 12 月,1 月所有的闪电强度都小于 50 kA,12 月所有的样本强度取值都小于 30 kA;(4)各月平均闪电强度在 20 kA 左右,各月均有半数以上的样本其强度在平均闪电强度以下,平均闪电强度遵循冬季低夏季高的年变化趋势。

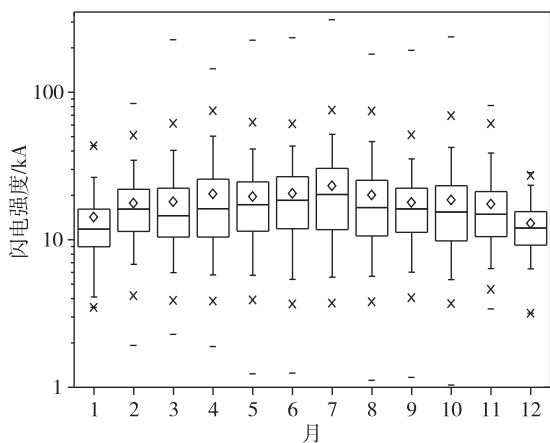


图 4 总闪电强度年变化特征

Fig.4 The annual variation of the total flash intensity

由闪电强度的分布特征可以看出,与闪电频数不同,闪电强度随时间的分布有明显季节变化规律,一年中 2—11 月均有可能发生强闪电,而 1、12 月发生强闪的概率较小。由于闪电集中发生在 6—8 月,因此,该时段内强闪电出现频数很高。

2.3 闪电频数和强度的空间分布特征

结合大连地区的边界地图,以 $1\text{ km} \times 1\text{ km}$ 范围为基本单元,统计 2007 年 1 月 1 日—2011 年 12 月 31 日期间的闪电定位资料,分别绘制大连地区的雷

击大地密度图和雷击强度(图 5)。

由图 5a 可以看出,大连地区大部分区域的平均雷击大地密度值低于 10 km^{-2} ,平均雷击大地密度的 2 个极大值中心都位于长海县和普兰店市,五年累计雷击数最大可达 200 km^{-2} 以上。这主要是由于这两个地区受夏季风影响,易遭遇强对流天气袭击,从而导致雷电出现频繁。由图 5b 可以得出:大连地区大部分区域的平均雷击强度值介于 5~30 kA 之间,平均雷击强度的极大值中心都位于主城区、金州区、瓦房店市西部及庄河市东部,最大可达 98 kA,而普兰店市及长海县为雷击强度相对小值区。由此可知,长海县虽然遭受雷击的频率很高,但雷击强度相对较低。

3 雷击风险度模糊函数构造及个例分析

由以上分析可知,虽然部分地区(长海县和普兰店市)遭遇雷击频次较多,但其电流强度却相对较弱,这对预测雷击风险度提出了挑战,急需提出一种可综合不同表征雷电特征因子的方法,对雷击的风险程度作出评估和预测。本研究引入中国气象局 2008 年发布的《雷电危险度等级》(征求意见稿)中提供的模糊矩阵法,构造适用于大连地区的雷击风险度综合指数预测模型,为雷击风险的预测提供有效方法。

3.1 雷电等级的划分及阈值的计算

利用 2007—2011 年 5 a 间的雷电记录构造雷电风险度函数。首先,将雷电划分为 4 个等级:弱雷电、中等雷电、强雷电和特强雷电,并对应危险程度(表 1)。统计市县地域范围内 5 a 以上雷电器测资料中每小时的地闪数目(LF)和最大雷电流值(LI),绘制各因子的累计频数分布图。其中, LF 为县地域范围内 1 h 内的地闪数目(单位:个 $\cdot\text{h}^{-1}$); LI 为县地域范围内 1 h 内的最大雷电流值(单位:kA)。由于

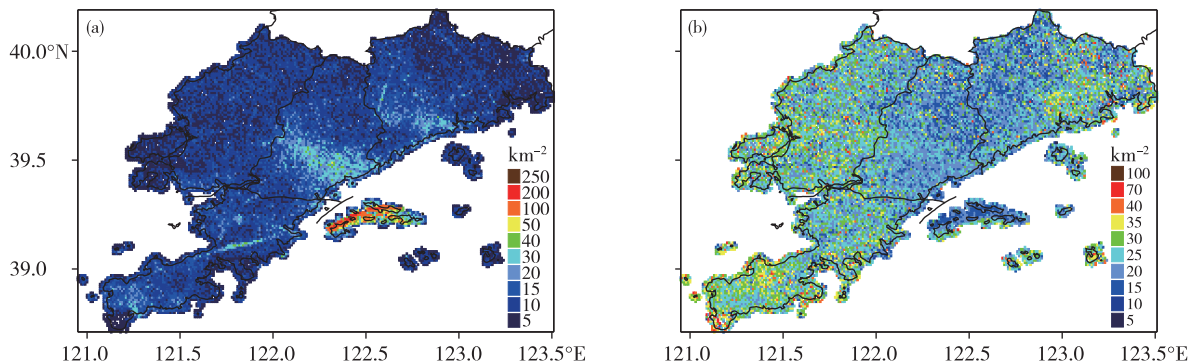


图 5 雷击大地密度(a;单位: km^{-2})分布和雷击强度(b;单位:kA)的分布

Fig.5 Distribution of (a) lightning density and (b) lightning intensity

两因子的累计频数到 98%后,不仅因子的离散度大且为小概率事件,所以将两因子的累计频数等于 98%所对应的因子值作为因子分级的上限值。故

而,两因子分级的下限值均取 0, LF 和 LI 的上限值分别取 74 次·h⁻¹和 88 kA(图 6a、b)。

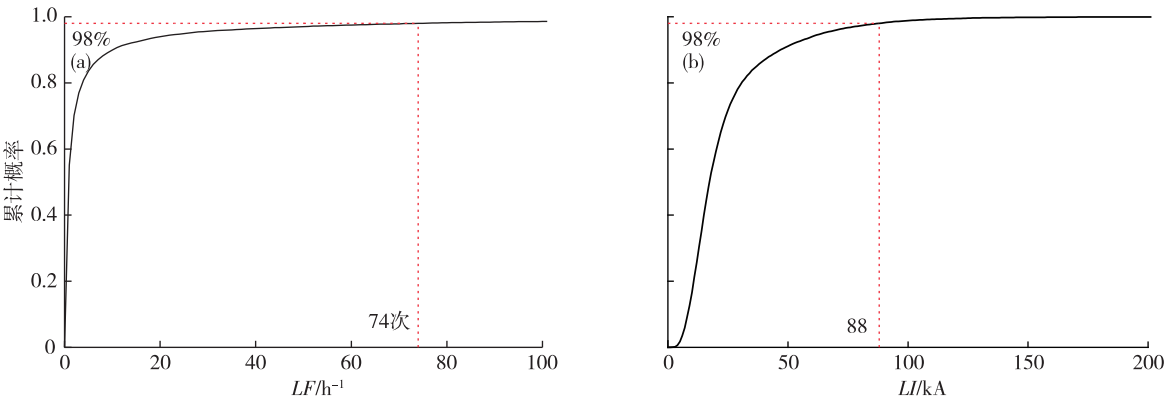


图 6 LF (a;单位:h⁻¹)和 LI (b;单位:kA)的累计频率
Fig.6 Cumulative lightning frequency of (a) LF and (b) LI

对各雷电危险度因子分级的上下限范围等间隔划分为 4 级,E1、E2、E3、E4 为分级临界值。如表 1 所示,各等级值均为 0 至上限值 4 等分构成。其中 E1、E2、E3、E4 分别对应雷电危险度等级。

表 1 雷电危险度因子分级

Table 1 The classification of lightning risk factor			
危险度因子	危险程度	LF/h^{-1}	LI/kA
弱雷电	E1(轻度)	18.5	22
中等雷电	E2(中度)	37	44
强雷电	E3(高度)	55.5	66
特强雷电	E4(极高)	74	88

3.2 建立各因子隶属度函数

当雷电频次(LF)与雷击强度(LI)因子存在差异时,模糊综合算法是确认两因子的分辨特性的最优选择。根据模糊综合算法,计算雷电危险度综合指数需率先建立隶属度函数。隶属度函数由多个线性函数($y=mx+b$)构成,其中: y 为隶属度; x 为雷电危险度因子预报值; m 和 b 为常数。用函数特征点值求解常数 m 和 b 可得出各因子各级别的隶属度函数。单因子对每级隶属度的函数公式如下(公式 1—8):

(1)大连地区内 1 h 内的地闪数目(LF)4 个级别的隶属度函数

$$1 \text{ 级 } y_1 = \begin{cases} 1, & x = 18.5; \\ \frac{1}{18.5}x, & 0 < x < 18.5; \\ -\frac{1}{18.5}(x-37), & 18.5 < x \leq 37. \end{cases} \quad (1)$$

$$2 \text{ 级 } y_2 = \begin{cases} 1, & x = 37; \\ \frac{1}{18.5}(x-18.5), & 18.5 < x < 37; \\ -\frac{1}{18.5}(x-55.5), & 37 < x \leq 55.5. \end{cases} \quad (2)$$

$$3 \text{ 级 } y_3 = \begin{cases} 1, & x = 55.5; \\ \frac{1}{18.5}(x-37), & 37 < x < 55.5; \\ -\frac{1}{18.5}(x-74), & 55.5 < x \leq 74. \end{cases} \quad (3)$$

$$4 \text{ 级 } y_4 = \begin{cases} 1, & x \geq 74; \\ \frac{1}{18.5}(x-55.5), & 55.5 < x < 74; \\ 0, & x = 55.5. \end{cases} \quad (4)$$

(2)大连地区内 1 h 内的最大雷电流值(LI)4 个级别的隶属度函数

$$1 \text{ 级 } y_1 = \begin{cases} 1, & x = 22; \\ \frac{1}{22}x, & 0 < x < 22; \\ -\frac{1}{22}(x-44), & 22 < x \leq 44. \end{cases} \quad (5)$$

$$2 \text{ 级 } y_2 = \begin{cases} 1, & x = 44; \\ \frac{1}{22}(x-22), & 22 < x < 44; \\ -\frac{1}{22}(x-66), & 44 < x \leq 66. \end{cases} \quad (6)$$

$$3 \text{ 级 } y_3 = \begin{cases} 1, & x=66; \\ \frac{1}{22}(x-44), & 44 < x < 66; \\ -\frac{1}{22}(x-88), & 66 < x \leq 88. \end{cases} \quad (7)$$

$$4 \text{ 级 } y_4 = \begin{cases} 1, & x \geq 88; \\ \frac{1}{22}(x-66), & 66 < x < 88; \\ 0, & x=66. \end{cases} \quad (8)$$

根据预测的每小时闪电数和最大强度,利用该隶属度函数(公式 1—8),可计算模糊矩阵 R ,进一步给出某地区雷电危险度综合指数。

3.3 大连市一次雷电灾害个例分析

2011 年 4 月 14 日,大连地区遭受强雷电灾害,造成 2 人死亡,造成经济损失 5 万余元。以此次雷电灾害为例,本次闪电累计的频次为 34 次,而最大电流可达 138 kA。利用构造的隶属度函数(公式 1—8)计算雷电各因子的隶属度,如表 2。表 2 中的各因子即可构成模糊矩阵 R 。

表 2 各因子的隶属度

Table 2 Membership degree of factors

C_i (雷电风险度因子预报值)	$LF(x=34)$	$LI(x=138)$
y_1	0.00	0.00
y_2	0.45	0.00
y_3	0.00	0.00
y_4	0.00	1.00

进一步计算各因子的权重以便将模糊矩阵归一化。权重因子的计算公式如下:

$$W_i = C_i / S_i. \quad (9)$$

其中: C_i 为雷电危险度因子预报值; S_i 为与 C_i 对应的雷电危险度因子各级临界值的平均值。 W_i 越大对总体雷电危险度影响越大。依据公式(9),并将权重归一化后获得权重矩阵 $W=[0.23, 0.77]$ 。依据归一化权重矩阵,进一步进行模糊矩阵复合运算,求出雷电危险度综合指数:

$$L_{\text{light}} = \{0.0, 0.1, 0.0, 0.77\}$$

因此,2011 年 4 月 14 日大连地区预报的雷电危险度等级为 4 级。由此可见,建立雷电危险度综合指数预测方法可在可预报雷电频次和强度的前提下,有效降低人员及经济财产损失。

4 结论

本文利用大连市 2007 年 1 月 1 日—2011 年 12 月 31 日的闪电监测数据,针对该地区闪电频率、强

度、极性以及时空变化等问题进行了详细分析,并给出了雷电危险度综合指数计算所需的各因子隶属度函数。分析表明:

大连地区 2—12 月都有发生强雷电的可能性,闪电高发期集中在 6、7 和 8 月,6、7 月雷电明显集中于午后和夜间,而从 8 月开始雷电发生时间向凌晨时段集中,午后明显减少。对人民生命财产造成危害。

大连地区大部分区域的平均雷击大地密度值低于 $10 \text{ 次} \cdot \text{km}^{-2}$,两个极大值中心都位于长海县和普兰店市,而大连市区遭受强雷电袭击的概率更高。

基于雷电危险度综合指数预测模型,结合雷电预报小时频次和强度,可对不同地区的雷电危险度等级进行预测并发布预警,更加直观、方便、高效的为公众提供气象服务信息。

在未来的研究中,可结合雷电预报小时频次和强度,对不同地区的雷电危险度等级进行预测并发布预警,以更好的减少人民生命财产损失。

参 考 文 献

- [1] 郅秀书,刘冬霞,孙竹玲. 闪电气象学研究进展. 气象学报, 2014, 72(5): 1054-1068.
QIE Xiushu, LIU Dongxia, SUN Zhuling. Recent advances in research of lightning meteorology. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 2014, 72(5): 1054-1068.
- [2] 许小峰. 雷电灾害与监测预报. 气象, 2004, 30(12): 17-21.
XU Xiaofeng. Lightning induced disasters and its detecting and forecasting. Meteorological Monthly (in Chinese), 2004, 30(12): 17-21.
- [3] 张义军,马明,吕伟涛,等. 闪电活动的气候学特征研究进展. 气象学报, 2008, 66(6): 906-915.
ZHANG Yijun, MA Ming, LYU Weitao, et al. Review on climate characteristic of lightning activity. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 2008, 66(6): 906-915.
- [4] 张鸿发,程国栋,张彤. 中国区域闪电分布和闪电气候的特点. 干旱气象, 2004, 22(4): 17-25.
ZHANG Hongfa, CHENG Guodong, ZHANG Tong. Characteristics of lightning distribution and lightning climate for China region. Arid Meteorology (in Chinese), 2004, 22(4): 17-25.
- [5] 李京校,宋海岩,肖稳安,等. 北京及其周边地区闪电活动的时空特征. 大气科学学报, 2013, 36(2): 235-245.
LI Jingxiao, SONG Haiyan, XIAO Wen'an, et al. Temporal-spatial characteristics of lightning over Beijing and its circumjacent regions. Transactions of Atmospheric Sciences (in Chinese), 2013, 36(2): 235-245.
- [6] 张德宏,王苏,唐宇,等. 淮安地区雷暴日及地闪特征分析. 气象科技进展, 2015, 5(6): 58-60.
ZHANG Dehong, WANG Su, TANG Yu, et al. Analysis of light-

- ning density in Huaian region. *Advances in Meteorological Science and Technology* (in Chinese), 2015, 5(6): 58-60.
- [7] 冯民学, 焦雪, 韦海容, 等. 江苏省雷电分布特征分析. *气象科学*, 2009, 29(2): 246-251.
- FENG Minxue, JIAO Xue, WEI Hairong, et al. An analysis of the lightning distribution features in Jiangsu Province. *Scientia Meteorologica Sinica* (in Chinese), 2009, 29(2): 246-251.
- [8] 李霞, 汪庆森, 巩晴霞, 等. 苏州地区雷电分布规律分析. *气象科学*, 2006, 26(4): 442-448.
- LI Xia, WANG Qingsen, GONG Qingxia, et al. Research of the lightning rule in Suzhou. *Scientia Meteorologica Sinica* (in Chinese), 2006, 26(4): 442-448.
- [9] 王学良, 刘学春, 黄小彦, 等. 湖北地区云地闪电时空分布特征分析. *气象*, 2010, 36(10): 91-96.
- WANG Xueliang, LIU Xuechun, HUANG Xiaoyan, et al. Analysis of the spatial and temporal distribution characteristics of the cloud-ground lightning in Hubei Area. *Meteorological Monthly* (in Chinese), 2010, 36(10): 91-96.
- [10] Orville R E, Huffines G R, Burrows W R, et al. The North American lightning detection network(NALDN)—Analysis of flash data; 2001—09. *Mon. Wea. Rev.*, 2011, 139(5): 1305-1322.
- [11] Smith J R, Fuelberg H E, Watson A I. Warm season lightning distributions over the northern gulf of Mexico coast and their relation to synoptic-scale and mesoscale environments. *Wea. Forecasting*, 2005, 20(4): 415-438.
- [12] 夏文梅, 徐芬, 慕熙昱, 等. 一次夏季雷暴天气过程中闪电活动特征分析. *气象科学*, 2011, 31(5): 652-658.
- XIA Wenmei, XU Fen, MU Xiyu, et al. Analysis of lightning characteristics in a summer thunderstorm. *Journal of the Meteorological Sciences* (in Chinese), 2011, 31(5): 652-658.
- [13] 杨超, 肖稳安, 冯民学, 等. 强对流天气雷达回波与闪电特征的个例分析. *气象科学*, 2009, 29(3): 403-407.
- YANG Chao, XIAO Wen'an, FENG Minxue, et al. A case study on characteristics of lightning and Doppler radar echo in a strong convective system. *Scientia Meteorologica Sinica* (in Chinese), 2009, 29(3): 403-407.
- [14] 温颖, 赵阳, 赵果, 等. 台风“莫拉克”登陆过程的闪电活动与雷达回波特征. *高原气象*, 2015, 34(3): 832-841.
- WEN Ying, ZHAO Yang, ZHAO Guo, et al. Characteristics of lightning activity and radar reflectivity during Typhoon ‘Morakot’ landfall. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 2015, 34(3): 832-841.
- [15] 刘垚, 包云轩, 缪启龙, 等. 杭州市雷电灾害风险区划及分析. *西北师范大学学报(自然科学版)*, 2014, 50(3): 99-105.
- LIU Yao, BAO Yunxuan, MIAO Qilong, et al. Disaster division and analysis of lightning hazard in Hangzhou City. *Journal of Northwest Normal University (Natural Science)* (in Chinese), 2014, 50(3): 99-105.
- [16] 扈海波, 李京校, 潘进军. 北京地区雷电灾害风险评估方法与应用. *气象*, 2012, 38(8): 1004-1011.
- HU Haibo, LI Jingxiao, PAN Jinjun. Lightning risk assessment and zoning in Beijing based on the technology of spatial grids. *Meteorological Monthly* (in Chinese), 2012, 38(8): 1004-1011.
- [17] 王娟, 湛芸. 2009—2012 年中国闪电分布特征分析. *气象*, 2015, 41(2): 160-170.
- WANG Juan, CHEN Yun. Analysis of the 2009—2012 lightning distribution characteristics in China. *Meteorological Monthly* (in Chinese), 2015, 41(2): 160-170.