

基于雷达资料的海北雷电特征分析及预警研究

赵国蓉, 刘冰

青海省海北州气象局, 青海 海北

收稿日期: 2024年2月21日; 录用日期: 2024年3月22日; 发布日期: 2024年3月28日

摘要

文章选取2021年海北州国家站历史雷电资料及海北州雷达站雷达产品资料, 结合同期海北高空资料, 研究了海北州雷电天气与雷达反射率因子、回波顶高、垂直液态水含量、速度场雷达产品及SI沙氏指数、IQ整层比湿积分、LI抬升指数和SRH风暴相对螺旋度高空参数的特征关系, 对雷电天气的雷达产品及高空资料指标进行统计分析, 得出了海北地区夏季雷电预报因子, 建立了雷电发生概率的多元回归方程, 提高了海北强对流天气预报预警的及时性和准确率。

关键词

短时强降水, 时空变化特征, 插值分析

Analysis of Lightning Characteristics and Early Warning Research in Haibei Based on Radar Data

Guorong Zhao, Bing Liu

Haibei Meteorological Bureau of Qinghai Province, Haibei Qinghai

Received: Feb. 21st, 2024; accepted: Mar. 22nd, 2024; published: Mar. 28th, 2024

Abstract

In this paper, by selecting the historical lightning data of Haibei National Station and the radar product data of Haibei Radar Station in 2021, combined with the high altitude data of Haibei in the same period, the characteristic relationship between lightning weather and radar reflectance factor, echo top height, vertical liquid water content, velocity field radar products, SI Sand index, IQ layer specific humidity integral, LI uplift index and SRH storm-relative helicity upper altitude parameters in Haibei was studied. The radar products and upper altitude data indexes of lightning weather were statistically analyzed, and the summer lightning forecast factors in Haibei region were obtained, the

multiple regression equation of lightning occurrence probability was established and the timeliness and accuracy of severe convection weather early warning in Haibei were improved.

Keywords

Short-Term Heavy Precipitation, Temporal and Spatial Change Characteristics, Interpolation Analysis

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

雷电灾害是我国常见的灾害性天气现象, 来势凶猛, 能量大, 破坏力极强, 越来越引起人们的关注。雷电是发生于自然大气中的灾害性天气现象, 具有高电压、大电流、强电磁辐射的特性。随着我国社会经济的快速发展, 雷电灾害造成的损失越来越严重及社会影响越来越大, 近年来, 雷电等强对流天气频繁袭击海北州, 对农业、交通、电力、旅游业等方面造成了严重影响, 威胁着人民的生产生活安全, 人民群众对防灾减灾对气象服务的要求越来越高。为了降低雷电造成的损失, 需要预报员准确地预报出雷电发生的时间和地点。要做好雷暴天气的监测、警报和预报服务工作, 首先需要较高时空密度的遥感监测技术以及实时进行监测的能力。新一代多普勒天气雷达以及高空探测资料为雷暴天气的监测、预警和短时临近预报服务提供了极为有效的信息, 发挥着不可替代的作用。

本研究主要是结合海北州地区的气候特征, 针对近三年的雷达资料、高空探空资料和闪电定位仪的资料, 特别是 2022 年 6~9 月的数据进行分析, 试图找出闪电活动特征和其它数据、资料的相关性, 得出海北州的雷电临近预报方法。

2. 资料与方法

2.1. 资料

本研究雷达资料来源于青海省海北州的 CINRAD/CD 型号天气雷达(36°95'02"N、100°90'58"E, 海拔高度 3088 m), 该雷达建于海北州海晏县西海镇, 于 2008 年 11 月 1 日正式运行, 并于 2020 年 4 月 1 日开始大修升级, 5 月 15 日开始试运行, 10 月 1 日正式开始试运行纳入国家数据考核范围, 其有效探测范围为 250 km, 扫描方式有 VCP11、VCP21、VCP31 或 VCP32, 即每个扫描周期中的产品可选择不同的显示仰角, 常用的降水模式 VCP21 的显示仰角为: 0.5°、1.5°、2.4°、3.4°、4.3°、6.0°、9.9°、14.6°和 19.5°。本研究所用的闪电定位数据为海北州气象局布设在全州的 5 部闪电定位系统提供, 分别位于门源国家基本气象站、祁连国家基本气象站、托勒国家基本气象站、海晏国家基本气象站、刚察国家基准气象站。

2.2. 研究方法

选取 2021 年海北州国家站历史雷电资料及海北州雷达站雷达产品资料, 结合同期海北高空资料, 研究海北州雷电天气与雷达反射率因子、回波顶高、垂直液态水含量、速度场雷达产品及 SI 沙氏指数、IQ 整层比湿积分、LI 抬升指数和 SRH 风暴相对螺旋度高空参数的特征关系, 统计分析得出雷电天气的雷达产品及高空资料指标, 得出海北地区夏季雷电预报因子, 建立雷电发生概率的多元回归方程, 提高海北强对流天气预报预警及时性和准确率。

首先找到 2008 年~2018 年海北州国家站历史雷电资料, 分析得出海北州雷电的时空分布特征; 再利用 2021 年海北州多普勒雷达站雷达资料统计海北州发生雷电天气时的雷达产品, 结合同期的高空资料, 统计得出适用于海北州雷电强对流天气的雷达及高空参数指标。

3. 雷电与雷达回波特征的关系

3.1. 雷电活动与雷达回波强度的关系

在过去 10~15 a 内, 科学家们已经普遍接受的一种主要雷电起电机为: 活跃的软雹和较小的冰粒子间的相互碰撞产生闪电, 而软雹、冰粒子及过冷却水的产生需要液态水的温度达到冰点以下。大气温度在对流层通常表现为随高度的升高而降低, 故闪电发生前后, 在某个温度层高度范围上雷达回波强度必然会表现为一定的特征量变化。从很多国内外文献中发现, 40 dBz 是学者们普遍比较认可的强度特征值, 但针对不同的地理环境和时间, 特征值有些不同[1] [2] [3] [4]。通过对海北的月雷电日数的统计得出: 每年的 7~8 月是雷电高峰期, 其次是 6 月, 其他月份雷电非常稀少甚至没有。本研究选取了 2021 年 6~8 月 92 d 的回波数据为研究对象, 其中 43 d 产生了强烈闪电活动。通过对雷达回波强度的变化特征分析得出: 趋近于 35 dBz 的回波强度是有、无雷电发生的分界线, 可初步用来作为判别是否将有闪电发生的一个特征参量。

3.2. 雷电活动与雷达回波顶高的关系

回波伸展的高度在一定程度上影响雷暴单体的对流强弱, 对流单体的发展与云顶高度及强中心高度正相关[5]。回波顶高(ET)是产生闪电的一个很重要的先决条件, 它与闪电发生的关系是比较密切的, 没有发展很高的云顶就没有产生大量冰相粒子的条件和净电荷分离的起电机。针对 2021 年 7、8 月份的强对流雷暴天气过程, 选取了 40 个雷暴单体发展过程进行分析, 由其闪电发生前后回波顶高的分布情况可发现, 闪电发生前的回波顶高高度基本都分布在 9 km 以下, 初闪发生时顶高在 9 km 及以上, 闪电活动最频繁时顶高递增到 11 km 左右; 其中, 40 个个例中有 34 个满足该条件, 占 85%。通过对雷达回波顶高的变化特征分析得出: 趋近于 9 km 的回波顶高是有、无雷电发生的分界线, 可初步用来作为判别是否将有闪电发生的一个特征参量。

3.3. 雷电活动与雷达速度场的关系

雷暴云在发展过程中具有较强的上升气流。上升气流携带大量的水汽向上运动, 当凝结形成降水时, 下沉气流和上升气流相间出现。径向速度场的分布是判断强对流天气的一种有效工具[6]。雷电天气的出现和发展往往和气流的辐散辐合以及气流的旋转有关[7]。径向速度分布图像中可以看出气流中的辐合辐散和旋转的特征, 并可给出定性和半定量的估算。辐合(或辐散)在径向风场图像中表现为一最大和最小的径向速度对, 两个极值中心的连线和雷达的射线相一致。气流中的小尺度气旋(或反气旋)在径向速度图像中也表现为一个最大和最小的径向速度对, 但中心连线走向则与雷达射线相垂直。具有辐散(或辐合)的反气旋(或气旋)则表现出最大最小值的连线与雷达射线走向呈一定的夹角。根据中心连线的长度、径向速度最大值、最小值及连线与射线的夹角, 可以半定量地估算反气旋(或气旋)的涡度和散度。这使得多普勒天气雷达在监测龙卷气旋和雷暴等灾害性强天气中有重要的指示作用。通过对比分析多次雷电天气过程当中闪电发生前距离站点 150 km 范围内的基本速度场的图像, 得出利于闪电发生的多普勒速度图像为: 一般是负速度的面积大于正速度的面积, 存在明显的辐合辐散区, 有时候在正负速度区会相互嵌入, 即存在逆风区。

3.4. 雷电活动与 VIL 的关系

垂直累积液态水含量 VIL 实际上就是液态水混合比的垂直积分, 可见 VIL 与反射率 Z 存在对应关系, 是对流单体强度的一个判断参量; 同时, 很多学者研究也表明, VIL 在实际预报预警中有一定的应用价

值, 虽然 VIL 与闪电的发生没有绝对的关系, 但其数值大小、强弱能体现出一定的对流强度特征, 对雷电临近预警也可以起到一些指示作用[8] [9]。VIL 是判别强对流天气造成的暴雨、暴雪和冰雹等灾害性天气的一种有效工具。针对 2021 年 7、8 月份的强对流雷暴天气过程, 选取 20 个雷暴单体发展过程进行分析, 由其闪电发生前后 VIL 的分布情况可发现: 雷电发生前, VIL 最大值均达到 7.5 kg/m^2 ; 初闪发生时, VIL 值均在 12.5 kg/m^2 以上, 其中达到 12.5 kg/m^2 以上的占 75%, 初闪发生时 VIL 有明显的“跃增”, 跃增幅度基本都在 5 kg/m^2 以上, VIL 值达到峰值时也是闪电分布密集的时刻。当 VIL 值低于 12.5 kg/m^2 后, 闪电活动步入消亡。通过对 VIL 的变化特征分析得出: VIL 趋近于 12.5 kg/m^2 是有、无雷电发生的分界线, 可初步用来作为判别是否有闪电发生的一个特征参量。

4. 初始闪电预警指标的研究

通过前面的分析, 找到了较好区分雷暴单体和非雷暴单体的雷达参量。但雷暴初始闪电预警预报除了考虑准确性, 还需要考虑时效性。通过对多个雷达参量进行筛选和组合, 选取了以下 3 个预警指标进行比较和分析:

预警指标 1: $CR > 35 \text{ dbz}$, $ET > 9 \text{ km}$;

预警指标 2: $CR > 35 \text{ dbz}$, $ET > 9 \text{ km}$, $VIL > 12.5 \text{ kg/m}^2$;

预警指标 3: $CR > 35 \text{ dbz}$, $ET > 9 \text{ km}$, $VIL > 12.5 \text{ kg/m}^2$, 负速度区面积大于正速度区。

4.1. 预警指标检验方法

将选取的预警指标使用列联表的方法进行可靠性检验, 列出天气实况以及预警结果的分类(见表 1), 表格中每列的统计数据为实况数据, 每行中的统计数据为使用雷达参量判断的预报结果。比如雷暴单体, 实况数据为 $(A + C)$ 次过程, 而使用预警方法识别出来雷暴单体 A 次, 识别成非雷暴单体 C 次; 非雷暴单体实况数据为 $(B + D)$ 次, 使用预警方法识别成雷暴单体 B 次, 非雷暴单体 D 次。那么预报出来的雷暴单体总数为 $(A + B)$ 次, 非雷暴单体数量为 $(C + D)$ 次。成功预警率(Probability of Detection, POD)表示在实况观测中预警成功的百分比, 数值范围介于 0~1。该数值越大, 表示越接近成功预警。定义为:

$$POD = A / (A + C) \times 100\%$$

预警虚报率(False Alarm Ratio, FAR)表示在预警中虚报的百分比, 数值范围介于 0~1。该数值越小, 表示越接近成功预警。定义为:

$$FAR = B / (A + B) \times 100\%$$

临界成功指数(Critical Success Index, CSI)表示在整个预警事件中(包括正确预警、虚报预警和漏报预警)正确预警的百分比, 数值范围介于 0~1。该数值越大, 表示越接近成功预警。定义为:

$$CSI = A / (A + B + C) \times 100\%$$

Table 1. Actual weather data and prediction results judged by using radar parameters

表 1. 天气实况数据及其使用雷达参量判断的预报结果

预警	实况		合计
	雷暴单体	非雷暴单体	
雷暴单体	A	B	$A + B$
非雷暴单体	C	D	$C + D$
合计	$A + C$	$B + D$	$A + B + C + D$

4.2. 预警指标检验结果

根据 3 种预警指标对 2022 年海北地区 25 个对流单体进行预警效果检验, 得出预警指标 1 的成功预警率是 3 个指标中最低的, 虚报率是 3 个指标中最高的, 其 POD、FAR、CSI 的预警指标数值分别为 84.7%、26.2%和 66%; 预警指标 3 的成功预警率是 3 个指标中最高的, 虚报率是 3 个指标中最低的, POD、FAR、CSI 分别为 96.4%、5.0%和 91.1%。引入初始闪电预警提前时间(Tf)和初始地闪预警提前时间(TCG)的概念, 其定义为雷达回波出现预警指标的时间与初始闪电或者初始地闪发生时间的间隔, 预警指标 1 虽然预报准确性较其他两个指标差, 但其预报时效性较好, 预警指标 1 中 Tf 平均为 12.2 min, 远远强于预警指标 2、3 中的 Tf; 与 2 和 3 相比, 指标 2 的 Tf 平均为 4.7 min, 优于指标 3 的 Tf 平均为 2.2 min。综合以上分析, 预警指标 2 在预报准确性以及预报时效性方面均表现较好, 是比较适合海北州雷电预警的预警指标。

4.3. 初始闪电预警方案

通过前面对 25 个对流单体的综合分析, 对对流单体是否发生闪电以及初始闪电发生时间的预警方案可以归纳为 3 个步骤:

步骤 1: 观察对流单体回波强度的变化。将 35 dBZ 回波顶高作为基础判断条件, 如果满足这个条件则对流单体有很大概率将要发生闪电。

步骤 2: 在满足步骤 1 后, 观察对流单体 35 dBZ 回波顶高的变化。如果 35 dBZ 回波顶高突破 9 km 高度, 则可以断定对流单体将在 10 分钟内发生初始闪电。

步骤 3: 在满足步骤 2 后, 如果 $VIL > 12.5\text{kg/m}^2$, 则可以判断对流单体将在 5 分钟内发生初始闪电。

为独立检验上述预报方法效果, 从 2022 年 6 月~8 月挑选了 20 次未进行预警效果检验的对流天气过程作为独立检验样本, 其中产生闪电的 16 次, 按照以上预报步骤检验, 发现 4 个未产生闪电的过程全部被识别出来, 16 次产生闪电的过程被识别出了 14 次, 2 次产生闪电过程识别成了未产生闪电, 成功率较高。

$$Y = \begin{cases} 1 \rightarrow \text{出现成功的结果} \\ 0 \rightarrow \text{出现失败的结果} \end{cases}$$

5. 探空资料的雷电潜势预报方程的建立

5.1. Logistic 回归的概率公式

回归分析(Regression)是研究一个或多个自变量(Independent)与一个因变量(Dependent)之间是否存在某种线性关系或非线性关系的一种统计学分析方法。强对流能否发生与各个物理量指数之间的关系, 适宜采用二值 Logistic 回归进行分析。对一个试验样品在一组自变量作用下所发生的结果用指示变量 Y 表示, Y 的赋值规则为:

记出现成功结果的概率为 $P(Y=1)$ (简记为 P); 出现失败结果的概率为 $Q(y=0)$ (简记为 Q)。用 Logistic 回归公式表示 P 为:

$$P = \frac{e^{-5.671+0.124x_1-1.081x_2+0.001x_3-0.299x_4}}{1+e^{-5.671+0.124x_1-1.081x_2+0.001x_3-0.299x_4}} \quad (1)$$

其中, β_0 是与诸因素 x_i 无关的常数项, $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_m$ 是回归系数, 表示诸因素 x_i 对 P 的贡献量。

由于有关系式 $P + Q = 1$, 故根据式(1)得到出现失败结果的概率为:

$$Q = \frac{1}{1+e^{\beta_0+\beta_1x_1+\beta_2x_2+\dots+\beta_mx_m}} \quad (2)$$

由式(1)、(2)可以看出, 一个试验样品出现某种结果的概率与有关因素之间呈曲线关系。两个概率的

比数为:

$$P/Q = e^{\beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_m x_m} \quad (3)$$

我们把 P/Q 称为比数, 把 $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_m$ 称为 Logistic 回归系数。

5.2. 资料统计分析

在 2020~2021 年主汛期 304 d 08 时 TLOP 探空数据中, 选取 SI 沙氏指数、IQ 整层比湿积分、LI 抬升指数和 SRH 风暴相对螺旋度进行强雷暴天气发生的概率计算, 本研究中的强雷暴天气界定为海北州当天产生负闪 50 次以上。

各指数的分布中, IQ 指数 > 1799 的天数有 122 d, 实况出现 98 d 强天气, 出现概率最大, 为 80.1%, 该指数为 1799~1300、1299~1099、<1099 的出现概率分别为 39.9%、6.7%、2.1%; SI 指数 > 2.05 的天数有 114 d, 实况出现 87 d 强天气, 出现概率最大, 为 76.3%, 该指数为 2.05~1.65、1.65~1.04、<1.04 的出现概率分别为 50.8%、11.9%、1.4%; LI 指数 > 1.63 的天数有 120 d, 实况出现 77 d 强天气, 出现概率最大, 为 64.1%, 该指数为 1.63~1.13、1.13~0.54、<0.54 的出现概率分别为 48.8%、12.4%、3.4%; SRH 指数 > 0.3 的天数有 166 d, 实况出现 115 d 强天气, 出现概率最大, 为 69.2%, 该指数为 3~1、0.1~0、<0 的出现概率分别为 31.1%、10.8%、0.7%。

5.3. 建立海北州强雷暴天气潜势预报方程

根据二值 Logistic 回归分析得到各个参数值, 从而建立海北州雷电天气潜势预报方程:

$$P = \frac{e^{\beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_m x_m}}{1 + e^{\beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_m x_m}}$$

其中, x_1 表示整层比湿积分, x_2 表示沙氏指数, x_3 表示抬升指数, x_4 表示风暴相对螺旋度。

5.4. 历史样本回报

用此方法对 2020~2021 年主汛期 304 d 进行逐日 2 次回报。两年主汛期 304 d 发生强对流天气 131 次, P 值 ≥ 0.90 的天数有 124 次, 其中发生强雷暴天气 98 次, 准确率最高, 为 79%; P 值为 0.8~0.9、0.70~0.80、0.60~0.70、0.50~0.60、<0.50 的准确率分别为 59.4%、36.8%、24.3%、17.4%、5.2%。

5.5. 样本检验

将 2022 年 6~9 月的强对流天气作为检验样本进行检验。选取发生在 6~9 月的 7 次强雷暴天气, 7 次强对流的 P 值分别为 0.81、0.93、0.94、0.76、0.89、0.69、0.81, 有较好的雷电潜势预报能力。

6. 存在的问题及后期展望

① 由 CIMISS 下载的海北闪电资料与强天气诊断分析平台中的闪电资料无法保持完全一致, 给项目研究带来了不便;

② 海北全州没有建立探空站, 无法获取准确的探空资料, 只能应用西宁探空 08 时和 20 时数据, 影响了强对流潜势预报方程系数的准确性; 西宁探空站 K 指数资料缺失, 所以研究对象做了更改;

③ 强天气平台的闪电资料无法确定具体位置且为 1 h 闪电资料, CIMISS 下载的闪电资料需根据经纬度值依次确定闪电位置, 工作量巨大, 在研究闪电与雷达回波关系时, 无法确定精准的对应位置, 给研究结果带来了误差;

④ 2020 年海北雷达升级大修, 雷达资料缺失, 关键点无法提供可参考的雷达资料, 对研究结果产

生了较大的影响;

⑤ 虽然雷达的时空分辨率较好,但是只有在降水粒子形成之后才会有较强的回波变化,使得预警的提前时间有限;雷达体扫过程中有一些盲区,使得该区域下的对流天气监测困难;云内的实际温度变化较大,可能与之前探空获取的温度曲线有比较明显的差异,从而影响雷电监测预报预警;

⑥ 由于闪电定位仪的资料有限,同时跟踪到闪电活动的发生时,往往雷暴已经处于发展阶段,预警时间有限,因此不能单独依靠这一种方法进行雷电的临近预警。

后期将定位更精准的闪电发生方位,进一步更精准地与雷达回波对应,并加强多元资料的融合,建立更精准的预警指标。

7. 主要研究结论

① 通过对 2021 年 6~8 月海北多个雷电个例的统计分析,得出了海北地区雷电预警指标,初步将 $CR > 35 \text{ dBz}$ 、 $ET > 9 \text{ km}$ 和 $VIL > 12.5 \text{ kg/m}^2$ 用来作为判别是否有闪电发生的一个特征参量。

② 从速度图像来看,朝向雷达的负速度区面积大于离开雷达的正速度区面积,低层风场具有辐合上升运动,为对流活动的发展提供了有利的动力条件,同时也带动了雷达回波顶高的发展。

③ 进行预警指标检验后得出,将 35 dBz 发展强度与 VIL 值相结合分析对流云团,同时回波顶高变化来作出雷电的预警,效果最好。

④ 选取 SI 沙氏指数、 IQ 整层比湿积分、 LI 抬升指数和 SRH 风暴相对螺旋度进行了强雷暴天气发生的概率计算,建立了基于探空资料的海北州雷电天气潜势预报方程。

参考文献

- [1] 孟青,张义军,吕伟涛,等.雷电临近预警系统的运行试验[J].气象,2009,35(4):20-24.
- [2] 石玉恒,张义军,郑栋,等.北京地区雷暴的雷达回波特征与闪电活动的相关关系[J].气象,2012,38(1):66-71.
- [3] 黄钰,曾勇,周苑,等.一次强对流天气过程的闪电与雷达回波特征分析[J].中低纬山地气象,2018,42(4):37-42.
- [4] 居丽玲,牛生杰,陈连友.一次致灾雷暴过程的闪电雷达回波特征分析[J].气象科技,2011,39(4):429-437.
- [5] 王飞,张义军,赵均壮,等.雷达资料在孤立单体雷电预警中的初步应用[J].应用气象学报,2008,19(2):153-160.
- [6] 王飞.雷达资料在北京地区雷电预警中的应用研究[D]:[硕士学位论文].北京:中国气象科学研究院,2007.
- [7] 魏雪,黄兴友,孙伟,等.基于雷达资料的雷电特征分析及预警[J].气象与环境科学,2011,34(3):31-36.
- [8] 黄延刚,顾松山,杨才文,等.一次强对流过程中的闪电特征分析[J].广东气象,2007,29(3):7-10.
- [9] 刘冬霞,鄯秀书,冯桂力.华北一次中尺度对流系统中的闪电活动特征及其与雷暴动力过程的关系研究[J].大气科学,2010,34(1):95-104.