

# 基于闪电距离判定、雷达产品阈值控制的 雷电预警算法研究

张焯方<sup>1</sup> 冯建伟<sup>2</sup> 冯真祯<sup>1</sup> 杨超<sup>3</sup>

(1 福建省气象灾害防御技术中心,福州 350001;2 江苏省苏州市气象局,苏州 11602413;

3 福建省厦门市气象灾害防御技术中心,厦门 361012)

**摘要** 从研发专业雷电临近预警服务产品及提高其时效性的目的出发,以  $0.01^\circ \times 0.01^\circ$  栅格、6 min 为一个预警单元,在雷达阈值控制的雷电临近预警模型的基础上,对每个预警网格进行前 5 个时段内所发生闪电与网格的距离计算,按闪电逼近网格的距离和变化趋势确定预警规则,生成当前时刻往后 6 min 栅格、重点区域雷电发生情况的临近预警产品,并对模型的预报成功率进行了定量和定性化的评估,结果表明该模型相比传统依靠雷达阈值控制进行雷电临近预警的方法在栅格、区域的预报准确率都有一定的提高,计算速度快,可以较好地应用到实际特别是专业雷电临近预警服务中。

**关键词** 闪电;雷达;雷电预警;闪电距离判定

**中图分类号:** P429 **DOI:** 10.19517/j.1671-6345.20180332 **文献标识码:** A

## 引言

雷电灾害是常见的气象灾害之一,提高雷电预警产品的准确率与有效性,是实现“精准防灾”要求的重要技术支撑。当前国内在雷电预警特别是临近雷电预警的研究与应用上,主要有使用闪电、雷达以及卫星、探空、大气电场、天气形势预报等数据进行的识别、跟踪、外推、阈值控制等方法。在闪电的应用上,张其林,邵程远等分 4 种情形对闪电发生进行高密度区域识别并外推,得出雷电临近预警产品<sup>[1]</sup>。在雷达的应用上,吕伟涛,张义军等借鉴美国 NCAR 开发的 TITAN (Thunderstorm Identification, Tracking, Analysis, and Nowcasting) 算法对雷达数据进行重点区域识别与外推,得到格点雷电发生概率的结论<sup>[2]</sup>;秦微,张其林等人在深圳地区采用 TITAN 算法对某次强风暴过程中的强回波区进行分析得出该算法识别效果理想的结论<sup>[3]</sup>;刘维成,苟尚等对甘肃中部雷达回波单体与雷电活动之间的对应关系进行分析,得出回波强度、回波顶高、垂直累积液态含水量与雷电发生的阈值关系,并根据该结论建立了雷电预警方案<sup>[4]</sup>;常越,陈德生等人对湖南

省闪电的发生和雷达关系进行研究,认为闪电发生与回波强度、回波顶高、速度场特征、垂直液态水含量等有着密切的关系<sup>[5]</sup>;此外还有使用卫星、探空、大气电场等数据对雷电预警关系进行分析的研究。从这些雷电临近预警产品实际的专业服务应用来看,使用雷达产品数据进行重点区域识别与外推、同时结合对闪电高密度区域的识别与外推得到的雷电临近预警结果在一定公里半径范围的重点区域专业雷电预警应用服务具有较好的实践效果,但“雷达、闪电”加“识别、外推”的雷电临近预警模式计算量较大、产品生成时间较长,而专业雷电临近预警服务的有效时间很短,探索计算量少、同时准确率又满足应用需求的雷电临近预警模型是当前提高专业雷电临近预警服务的有效途径<sup>[6-7]</sup>。

论文针对上述问题,提出了一种根据闪电与预报区域距离大小、变化关系进行计算,同时考虑雷达产品阈值控制的方式得出雷电临近预警产品的模型,可以避免“识别、外推”的大计算量过程,同时又满足较好预报成功率的需求,达到更科学、准确、及时的专业雷电临近预警服务的目的。

<http://www.qxkj.net.cn> 气象科技

福建省科技厅社会发展引导性(重点)项目(2019Y0063)、福建省气象局开放式气象科学研究基金项目(2018K05)资助

作者简介:张焯方,男,1983年生,主要从事气象人工智能、气象影响评价方面研究,Email:228532148@qq.com

收稿日期:2018年6月15日;定稿日期:2019年6月13日

## 1 模型设计

### 1.1 闪电距离判定预警模型

将待研究的某个区域按  $0.01^\circ \times 0.01^\circ$  的大小划分为多个栅格单元,对每一个栅格单元逐一进行分析。

设当前时间为  $t_0$ ,计算距离  $t_0$  最近的前一个雷达时间,记为  $t_1$ (因雷达拼图数据的时间段是每小时的 00、06、12...、54 min,为了适配模型后面用到的雷达数据,这里让闪电数据也按雷达数据的时次进行计算。)计算  $t_2 \sim t_5$ ,分别等于  $t_1$  时间往前计算 6、12、18、24 min 的雷达时间;对  $t_1 \sim t_5$  的每一个雷达时次,计算在这个时刻距离该栅格最近的闪电与该栅格的距离,分别记为  $l_{nd1} \sim l_{nd5}$ ,对  $l_{nd1} \sim l_{nd5}$  进行最近距离的数值判定,当符合:① 5 个时次的  $l_{nd1}$ 、 $l_{nd2}$  有任意一个数值小于  $d_1$  ( $d_1$  的取值根据实际情况来确定,可参考本文第 2 节的实例应用部分,其代表的意义是当闪电已经在被考察栅格的附近时,就认定该栅格雷电预警状态为真。② 5 个时次的  $l_{nd1}$ 、 $l_{nd2}$ 、 $l_{nd3}$  有任意两个数值小于  $d_2$ ,且  $l_{nd1} \sim l_{nd4}$  中有任意两个的距离小于其前一个时次的距离数值(即有两个时次以上的闪电距离是减少的),则认定该栅格的雷电预警状态为真。实际代码按 0、1 取值。

当一个栅格已经被判定为真的雷电预警状态时,后面雷电时次的雷电预警状态判定对其无效,被判定为雷电预警真状态的栅格只进行预警状态解除的判定计算,一个栅格解除雷电预警状态的规则应同时满足:① 最迟的一个时次  $l_{nd1}$  距离大于  $d_3$ ;②  $l_{nd1} \sim l_{nd4}$  中有任意两个的距离大于其前一个时次的距离数值,(即有两个时次以上的闪电距离是增加的)则认定该栅格的解除雷电预警状态(图 1)。

实际在进行上述模型的栅格雷电最近距离  $l_{nd}$  计算时,因栅格数量较多(如下文实例应用部分的福建省经纬度网格为  $700 \times 800 = 56$  万个栅格。)如果对这些栅格进行逐一计算的话,实时的计算量将非常巨大。考虑到每个雷达时刻的闪电个数并不多,所以论文使用了以闪电为单位,以闪电所在栅格为中心,只对距离在  $d_r$  内的栅格进行栅格闪电最近距离的数值计算,如果某栅格已经有了闪电最近距离值,则比较两个数值的大小,取数值小的作为该栅格的闪电最近距离值,而其他没有在该闪电距离  $d_r$  范围内的其他栅格数值都按 9999 等大数值替代,这样

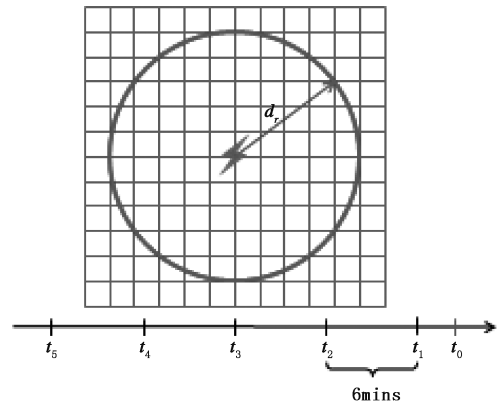


图 1 闪电距离判定模型示意

对某个雷达时刻范围内的所有闪电进行循环后,即可得到该时刻的  $l_{nd}$  栅格图层数值,避免逐一栅格计算所带来的超大计算量问题。

### 1.2 雷达数据修订优化模型

上述使用闪电数据进行栅格预警状态计算的方法可以用于闪电不是第一时间发生在指定栅格内的情况,即该方法通过计算闪电移动时,距离栅格远近的情况来达到雷电预警的目的,但它无法对第一个闪电发生的可能性进行预警<sup>[8-10]</sup>。为了弥补上述闪电模型在该问题上存在的不足,同时也为了提高雷电预警准确率,论文参考了当前国内使用雷达预警雷电发生的研究成果,选用组合反射率、垂直液态水含量、回波顶高 3 个指标,对栅格内的雷电预警状态进行计算、判断。

选择待预警区域历史雷电活动时段的闪电、雷达组合反射率、垂直液态水含量、回波顶高数据为样本,同样以  $0.01^\circ \times 0.01^\circ$  的栅格为数据单元,设雷达组合反射率、垂直液态水含量、回波顶高数据时间为  $t_1$ ,闪电数据取对应单元  $t_1 + 6$  min 后的发生情况,如该单元在  $(t_1 + 6 \text{ min}, t_1 + 12 \text{ min})$  时间区间内有发生闪电,则将该时次、单元的雷达组合反射率、垂直液态水含量、回波顶高数据存入到待分析的数组中,完成所有循环后得到一组样本数据,该组数据代表了历史情况下,6 min 后指定栅格单元会发生闪电的雷达(雷达组合反射率、垂直液态水含量、回波顶高数据)数据情况。对该组雷达组合反射率、垂直液态水含量、回波顶高数组进行统计分析,取每个指标的四分位数作为临界阈值,作为实际判断未来栅格雷电预警状态的模型。

### 1.3 综合计算规则

结合雷电预警状态栅格图层,对每个预警栅格按如下条件运算,得到最终的综合预警结果:

(1)原栅格预警值为 0 时,闪电预警模型结果为 1,雷达预警模型结果为 1,则综合预警判定结果为 1;闪电预警模型结果为 1,雷达预警模型结果为 0,考察  $l_{nd1} \sim l_{nd4}$  有 3 个以上距离变小,则判定为 1,否则判定为 0。这主要是为了规避我们在选择雷达历史样本数据四分位点作为阈值,而略去四分位点前的情况而做的弥补;闪电预警模型结果为 0,雷达预警模型结果为 1,则综合预警判定结果为 1,主要作用即在于填补闪电预警模型无法进行首次闪电发生预警的不足;闪电预警模型结果为 0,雷达预警模型结果为 0,则综合预警判定结果为 0。

(2)原栅格预警值为 1,即原栅格上一时次判定为预警状态时,只要闪电预警模型或雷达预警模型有任意一个结果为 1,则该栅格预警状态继续保持,值仍为 1;当闪电预警模型或雷达预警模型值都为 0 时,则解除该栅格预警状态,值为 0。

将综合预警判定结果进行 GIS 图层化输出,得到最终综合预警判定结果。

## 2 实例应用与分析

为了验证论文所建立雷电预警模型的可行性和准确程度,论文以福建省为例,对该模型进行实例应用与分析,具体过程讨论如下:

### 2.1 样本数据来源

福建省 2015、2016 年闪电定位数据,剔除 2 站观测、幅值在 2 kA 以下的闪电记录。

强天气短时临近预报系统(SWAN)产品目录下的雷达拼图数据(雷达组合反射率、垂直液态水含量、回波顶高数据)。

### 2.2 雷达阈值计算

按前文讨论的方法对福建省 2015、2016 年的闪电、雷达数据进行 6 min 后发生闪电的雷达样本数据提取,得到所有 6 min 后有记录发生闪电的雷达组合反射率、垂直液态水含量、回波顶高数据样本集,进行数理统计分析(图 2)。

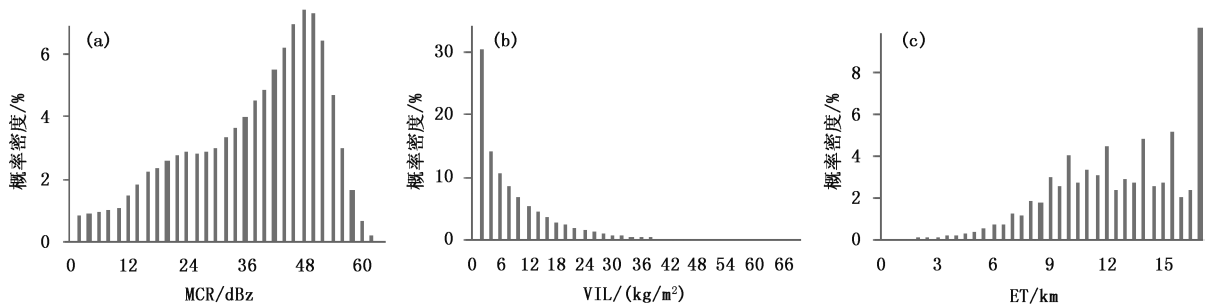


图 2 雷达组合反射率 MCR(a),垂直液态水含量 VIL(b),回波顶高 ET(c)的概率密度分析

从历史闪电发生的雷达数据样本来看,福建省发生闪电的雷达组合反射率平均值 36.9 dBz,四分位数为 37 dBz,较大一部分数据集中在 40 dBz 以后;垂直液态水含量反射率平均值 8.34 kg/m<sup>2</sup>,四分位数为 1.5 kg/m<sup>2</sup>,大部分数据集中在低值区域(约 0~12 kg/m<sup>2</sup>);回波顶高平均值 14.17 km,四分位数为 11 km,数据分布较为分散,大概 7 km 以上的回波顶高的发生概率较高。

综上分析,使用雷达组合反射率 37 dBz、垂直液态水含量 1.5 kg/m<sup>2</sup>、回波顶高 11 km 作为雷达预警控制的阈值,即当某个栅格的 3 个雷达产品数值超过上述数值,即认为 6 min 后、12 min 内可能发生闪电;取直接闪电预警判定距离  $d_1 = 10$  km,间接

闪电预警判定距离  $d_2 = 15$  km,闪电预警解除判定距离  $d_3 = 15$  km。

由于临近预警产品的服务对象是一定半径,一般为 5 km 范围内的区域,考虑福建闪电定位监测历史数据的误差情况、雷电电磁效应可能影响被保护区域的距离以及程序运行以来的调试、优化情况,设置这样的距离效果是比较好的,距离设计太大,容易产生大量的虚警,距离设计太小,可能使预警信息来不及发送到服务方而失去预警的效用。

### 2.3 应用分析

本文研究的模型自 2018 年 3 月上旬以来在福建省实际业务工作中进行了试运行与运行,总体上看,本文所建立的雷电预警模型在这些雷电过程的

预警应用中取得了积极的效果。从临近预警的图片产品与对应实时的闪电分布情况来看,论文所设计模型的预警结果与实时闪电分布基本重合、对应,相比之单独采用雷达产品进行预报(即同样使用前文所得出的雷达组合反射率、垂直液态水含量、回波顶高作为雷达预警控制的阈值),论文所设计模型能有效弥补和修正单独采用雷达预报存在的不足。以福建省 2018 年 5 月 22 日 16:00 阶段的预警为例,如图 3 所示,其中图 3a 是本文所采用的“闪电距离判定+雷达产品阈值控制+综合判定分析”的预警结果,图 3b 是仅使用“雷电产品阈值控制”得到的预警结果,图 3c 为预警时刻后推 15 min 的实际闪电分布情况。

由图 3 可知,本文所采用的预警模型在预警效果上较之单一采用雷达的预警在整体上更贴近于实际的闪电分布,如图 3 所圈出的 A、B 区域,可能由于雷达数据在这两个区域所表征的对流活动并不明显,或雷达数据可能存在阻挡或其他干扰,使得这两个区域的雷达预警算法并没能得出存在雷电活动的结论(B 区域探测到的都是正闪),而论文所建立的闪电距离判定模型通过这两个区域前 4 个时次内闪电活动的情况,得出该区域存在雷电活动的预警信息,一定程度上弥补了单一采用雷达数据的不足;而其他同时有闪电、雷达预警的位置,论文建立的闪电、雷达综合判定规则对雷达预警结果做了修订,使得综合预警效果得到进一步地精细化和提升;此外在试运行期间,其他没有明显雷电活动的日期,该模型预警效果也较为稳定,没有出现错误性的预报。

为了更精确了解本模型的实际准确率情况,论文以福建省行政区域内所有  $0.01^{\circ} \times 0.01^{\circ}$  栅格单位为评估对象(约 13.75 万个栅格),随机选取 4 d (2018 年 5 月 29 日、2018 年 7 月 1 日、2018 年 8 月 2 日、2018 年 9 月 21 日)的闪电定位数据、雷达数据进行准确率评估,每 6 min 为一次评估时次,每个时次对所有  $0.01^{\circ} \times 0.01^{\circ}$  栅格进行是否发生闪电的 0-1 二分类预警,取实际下一个时段后  $0.01^{\circ} \times 0.01^{\circ}$  栅格的是否有闪电定位数据记录为验证标准,计算平均预警临界成功指数 SCI(Critical Success Index)作为评估标准,最终计算得  $SCI=67.12\%$ ,考虑到目前闪电定位数据定位位置、时间与实际的误差,这个准确率还是可以接受的。而本模型的实际应用则是针对某个特定点一定半径范围内的专业雷电临近预报

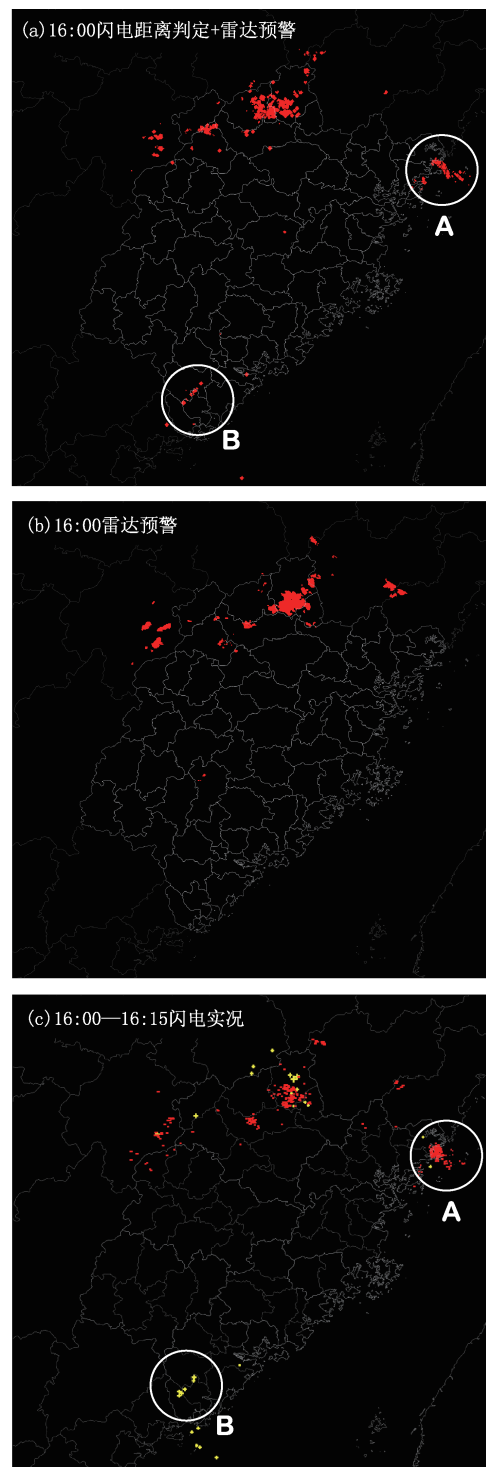


图 3 模型效果检验对比

(图 a、b 中红色区域表示未来可能发生雷电的预警栅格,图 c 中红色“-”表示负闪,黄色“+”表示正闪)

服务,因此考查一定范围内的准确率更具有实际意义,论文选取福建省 70 个国家观测站为中心、5 km 半径范围内的区域为验证对象,同样以上述随机选

取的 4 d 雷电过程为样本,对于某个时刻(雷达时间)、某个验证区域,当其所包含的栅格中有任意一个发生预警时,即认为该区域为预警状态,当在该预警时段该区域有监测到一个以上的地闪数据,即标记该验证区域发生闪电,以此规则对所有站点计算平均预警临界成功指数 SCI,得  $SCI=85.15\%$ 。

将上述定量验证代码的预报算法调整为单独使用雷达阈值控制的算法进行预警,其余设置不做改变,重新计算栅格、福建省 70 个国家观测站 5 km 半径范围的 SCI,并与论文所建立的包含对闪电距离判定模式的综合算法 SCI 进行比较(表 1)可以看出,论文所设计的模型在 SCI 准确率上都比常规单独使用雷达阈值控制的算法要好。

表 1 算法定量化评估计算结果(SCI 平均值) %

模型	全省 $0.01^\circ$ 栅格	全省 70 个国家站 半径 5 km 范围内
雷达阈值控制	65.62	82.77
雷达阈值控制+ 闪电距离判定	67.12	85.15

### 3 结论与讨论

本文以  $0.01^\circ \times 0.01^\circ$  栅格单位为预警对象,根据预警对象与闪电定位数据的距离判定关系,建立了一种基于闪电定位数据的雷电预警模型,并引入雷达阈值控制对该模型进行了补充和优化,确定两种方法相互补充的综合预警规则,最后以福建省为例,对该模型进行了实例检验和分析。

(1) 本文所讨论的基于闪电距离判定模式的闪电预警模型,实际上也可以看成是一种根据闪电发生位置结合栅格单元的闪电外推模型,相比于目前常用的 TITAN 外推闪电重点区域的方法,该模型在计算量上有一定程度的减少和优化,是一种快捷的闪电预警模型。模型单独预警的能力较为一般,特别是存在无法对首次闪电进行预警,如果不结合其他预警判定方法的话得出的预警区域存在较大地不足,但在结合雷达产品阈值控制的预警方法后,整

体预警效果得到了很大地提升,“闪电距离判定+雷达产品阈值控制+综合判定分析”的预警模式具有一定的实用性。

(2) 该模型的基础是闪电定位数据,闪电数据的准确情况直接影响了模型的预警效果,以应用实例的福建省为例,福建省闪电定位数据的误差在 0.5~5 km 之间,时间上也存在一定的偏差,因此在预警结果上偶尔会存在一些与实际天气、雷达背景有错位的结论。加强对闪电定位数据准确率和精确度的修正和优化,是提高雷电预警模型效能的一个重要工作。

(3) 在实际应用中,由于雷达数据存在一定的延时(如雷达数据延迟一般在 4~5 min),因此论文在雷达阈值的预报方式上采用了当前雷达产品预报下一个雷达时次雷电发生情况的方法,从整体应用上看,这样的处理模式可以很好地满足专业雷电临近预警服务对预报产品时效性的要求,同时预报成功率也有了一定程度的提高,从实际应用效果上看,可以很好地满足业务应用需求。

### 参考文献

- [1] 张其林,邵程远,路明月,等. 雷电监测预警系统在青岛地区试验结果分析[J]. 气象科技, 2010, 38(5): 594-598+666.
- [2] 吕伟涛,张义军,孟青,等. 雷电临近预警方法和系统研发[J]. 气象, 2009, 35(5): 10-17+131.
- [3] 秦微,张其林,赖悦,等. 一次飊线过程的雷电临近预警分析[J]. 科学技术与工程, 2016, 16(8): 35-41+48.
- [4] 刘维成,苟尚,傅朝. 雷达资料在高原东北侧雷电预警中的应用[J]. 气象, 2015, 41(10): 1253-1259.
- [5] 常越,陈德生,郭在华. 多普勒天气雷达与雷电预警关系研究[J]. 气象与环境科学, 2010, 33(1): 36-39.
- [6] 张超,吴国周,宋海清,等. 基于 CLDAS 温度适宜度指标空间化方法[J]. 气象科技, 2017, 45(3): 555-560.
- [7] 张焯方,冯真祯,王颖波,等. 基于 GIS 的网格化雷电灾害风险评估模型及其应用[J]. 气象科技, 2016, 44(1): 142-147.
- [8] 杨长业,舒小健,高太长,等. 基于雨强分级的夏季降水微物理特征分析[J]. 气象科技, 2016, 44(2): 238-245.
- [9] 许小峰. 雷电灾害与监测预报[J]. 气象, 2004, 30(12): 17-21.
- [10] 袁铁,郗秀书. 卫星观测到的我国闪电活动的时空分布特征[J]. 高原气象, 2004, 23(4): 488-494.

## Lightning Early Warning Algorithm Based on Lightning Distance Judgment and Radar Product Threshold Control

Zhang Yefang<sup>1</sup> Feng Jianwei<sup>2</sup> Feng Zhenzhen<sup>1</sup> Yang Chao<sup>3</sup>

(1 Fujian Meteorological Disaster Prevention Technology Center, Fuzhou 350001; 2 Suzhou Meteorological Service, Jiangsu, Suzhou 215000; 3 Xiamen Meteorological Disaster Prevention Technology Center, Fujian, Xiamen 361012)

**Abstract:** In order to develop and improve the professional lightning early-warning/nowcasting service products and their timeliness, this paper calculates the distance for each grid between the lightning occurring in the first 5 periods of early warning and the grids on the basis of 6-min and  $0.01^\circ \times 0.01^\circ$  grids, and on the foundation of the lightning nowcasting and early warning model controlled by the radar thresholds. According to the size and changing trend of lightning approaching grid distance, the early warning rules are determined, and the nowcasting warning products of the occurrence of lightning in the grids and key areas in the next 6 minutes are generated. The prediction success rate of the model is evaluated quantitatively and qualitatively. The results show that compared with the traditional method of relying on radar threshold control for lightning nowcasting and early warning, the prediction accuracy of grating and region is improved, and the calculation speed is faster, which can be applied to the practical and especially operational lightning nowcasting and early warning service.

**Keywords:** lightning; radar; lightning warning

---

### 欢迎订阅《气象科技》

《气象科技》由中国气象局气象探测中心、中国气象科学研究院、北京市气象局、国家卫星气象中心及国家气象信息中心联合主办。报道大气科学和相关科学各领域新理论、新方法和新技术,也刊载反映大气科学各领域发展水平的综合评述。主要栏目:大气探测与信息技术,天气气候与数值预报,应用气象与科学试验,台站实用技术等。欢迎气象部门和相关学科的业务、科研、技术开发人员以及相关院校师生投稿和订阅。《气象科技》为大 16 开本双月刊,全年定价:120 元,全年随时订阅。

**联系地址:**北京市海淀区中关村南大街 46 号,中国气象局气象探测中心,《气象科技》编辑部

**http:** //www.qxkj.net.cn, **邮政编码:**100081, **电话:**(010)68407256, **Email:** qxkj@cma.gov.cn

**户名:**中国气象局气象探测中心, **账号:**4043200001819900025525, **开户行:**华夏银行北京紫竹桥支行