

# 雷电临近预警方法和系统研发

吕伟涛<sup>1,2</sup> 张义军<sup>1,2</sup> 孟 青<sup>1</sup> 姚 雯<sup>1</sup>  
马 颖<sup>1</sup> 马 明<sup>1</sup> 郑 栋<sup>1</sup> 王 飞<sup>1</sup>

(1. 中国气象科学研究院雷电物理和防护工程实验室, 北京 100081;  
2. 中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室)

**提 要:** 为满足高速发展的现代社会对雷电预警预报气象服务日益增加的需求, 中国气象科学研究院研发了雷电临近预警系统(CAMS-LNWS)。CAMS-LNWS 采用了多资料、多参数和多算法集成的雷电临近预警方法, 能够综合利用雷达、卫星、闪电监测系统、地面电场仪和探空仪等的观测资料, 参考天气形势预报产品和雷暴云起电、放电模式运行的结果, 结合区域识别、跟踪和外推算法与决策树算法, 自动生成雷电活动潜势预报结果和雷电临近预警结果, 并提供多种形式的雷电临近预警产品, 以满足不同的应用需求。该系统人机界面友好, 参数接口丰富, 简单易用, 有利于在各地区的推广应用。同时该系统采用了模块化的结构设计, 具有灵活的扩充性, 便于今后对预警方法的不断升级和改进。

**关键词:** 雷电 临近预警 外推 组合预报

## Development of Lightning Nowcasting and Warning Method and System

Lu Weitao<sup>1,2</sup> Zhang Yijun<sup>1,2</sup> Meng Qing<sup>1</sup> Yao Wen<sup>1</sup>  
Ma Ying<sup>1</sup> Ma Ming<sup>1</sup> Zheng Dong<sup>1</sup> Wang Fei<sup>1</sup>

(1. Laboratory of Lightning Physics and Protection Engineering, CAMS, Beijing 100081;  
2. State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences)

**Abstract:** To meet the increasing demand of lightning nowcasting and warning services with the rapid development of modern society, Chinese Academy of Meteorological Sciences developed a Lightning Nowcasting and Warning System (CAMS-LNWS), which integrates multiple observation data, multiple parameters and multiple algorithms. In the lightning nowcasting

资助项目: 国家自然科学基金(40605004)和中国气象局气象新技术推广项目(CMATG2005M12)

收稿日期: 2008年8月25日; 修定稿日期: 2008年12月21日

and warning method, many observation data such as radar, satellite, lightning monitoring system, surface electrical field mill, sounding data, etc., are used. The forecasting products of synoptic situation and the numerical simulation of thunderstorm electrification and discharge model are also considered. Two basic algorithms are implemented: one is area identification, tracking and extrapolating algorithm, and the other is decision tree algorithm. CAMS-LNWS can provide lightning activity potential prediction product and lightning nowcasting and warning products. The latter can be showed in several ways to meet various needs of different applications. It is easy to implement applications of CAMS-LNWS in different regions as a result of its friendly man-machine interfaces and rich controls parameters. Additionally, CAMS-LNWS has modular structure design with a flexible expansibility, which can provide convenient way for the continuous upgrading and improving of nowcasting and warning method in the future.

**Key Words:** lightning nowcasting and warning extrapolation combination forecast

## 引 言

雷电是发生于大气中的一种壮观的天气现象,伴随着瞬态大电流、高电压和强电磁辐射等特征,常会引起重大的灾害事故。在对雷电的防护中,除了采用避雷针等装置对特定目标进行直接防护以外,利用多种仪器的观测资料对雷电活动进行预警和预报,进而在雷暴过境期间采取必要的措施以尽量减小损失也是当前主要采取的防护手段之一。

临近预报(Nowcasting)是指0~2h的天气预报,实时观测资料是其主要的决策依据。长期以来,国内外的研究人员在利用雷达和卫星等探测资料进行雷电临近预报方面做了大量深入的研究工作。例如:美国空军第45天气中队给出了以雷达为工具的雷电临近预报经验规则,主要用到了最大回波强度及其出现高度、强回波体积、顶高等参数,对单体雷暴、砧状云、碎云等的云闪、地闪的预报提供了不同的规则<sup>[1]</sup>;Smith采用同步卫星红外云图和美国国家闪电监测网的地闪定位结果,对两次雷暴过程进行了分析,对比了云顶冷却率超过 $0.5^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 的时间和首次地闪

出现的时间,结果表明前者比后者提前了半小时或更长时间<sup>[2]</sup>;Hondl和Eilts通过分析佛罗里达中部地区雷暴过程中多普勒天气雷达回波的演变,发现在冻结层附近首先探测到10dBz回波可以作为雷暴的初生特征,比首次地闪提前5~45min,中值为15min<sup>[3]</sup>;王飞等对北京地区多个单体过程的分析表明,40dBz是比较适合该地区雷电预警的一个雷达回波特征参量<sup>[4]</sup>。研究人员之所以采用上述的各种指标来预报闪电,是因为它们与雷暴起电过程有关,如云顶温度及其变化率与云顶高度以及对流发展的过程密切相关等<sup>[5]</sup>。

国内的部分地区虽然已经安装了多普勒雷达、SAFIR干涉仪<sup>[6]</sup>、地闪定位仪、地面大气电场仪等探测设备,但这些资料在雷电临近预警方面的应用研究工作还较少,如何有效地利用这些探测资料进行客观的雷电临近预警方面的研究是迫切需要开展的。为进一步提升我国雷电研究水平,更好地为各行各业提供雷电预警预报服务,中国气象科学研究院雷电物理和防护工程实验室于近几年开展了雷电临近预警方法的研究<sup>[4,7-8]</sup>,并开发了雷电临近预警系统(Lightning Nowcasting and

Warning System, CAMS-LNWS), 通过在气象部门的业务推广试验, 不断进行改进和完善, 目前已经基本能够满足日常业务运行的需求。下面将对 CAMS-LNWS 中雷电临近预警方法的整体框架和系统的流程进行介绍, 并重点阐述区域识别、跟踪和外推算法的实现及其在不同资料处理模块中的应用方法。

## 1 雷电临近预警方法的整体框架

利用具有不同时空分辨率特性的观测资料, CAMS-LNWS 能够给出多种时空尺度上的预报产品(图 1)。总体上来说, CAMS-

LNWS 首先利用天气形势预报产品、探空资料和雷暴云起电、放电模式, 在大的空间尺度上给出整个区域在 0~12h 或 0~24h 内发生雷电活动的可能性(雷电活动潜势预报), 然后逐步引入时空分辨率越来越细的准实时和实时观测数据(卫星、雷达、闪电监测系统 and 地面电场仪等的资料), 对有可能发生或已经发生闪电的区域进行预测、识别、跟踪和外推, 给出雷电临近预警结果。由于闪电监测系统和地面电场仪的实时观测资料与雷电活动是直接相关的, 因此, 在利用其他资料进行雷电临近预警时, 闪电监测结果和地面电场的记录也是重要的参考依据。

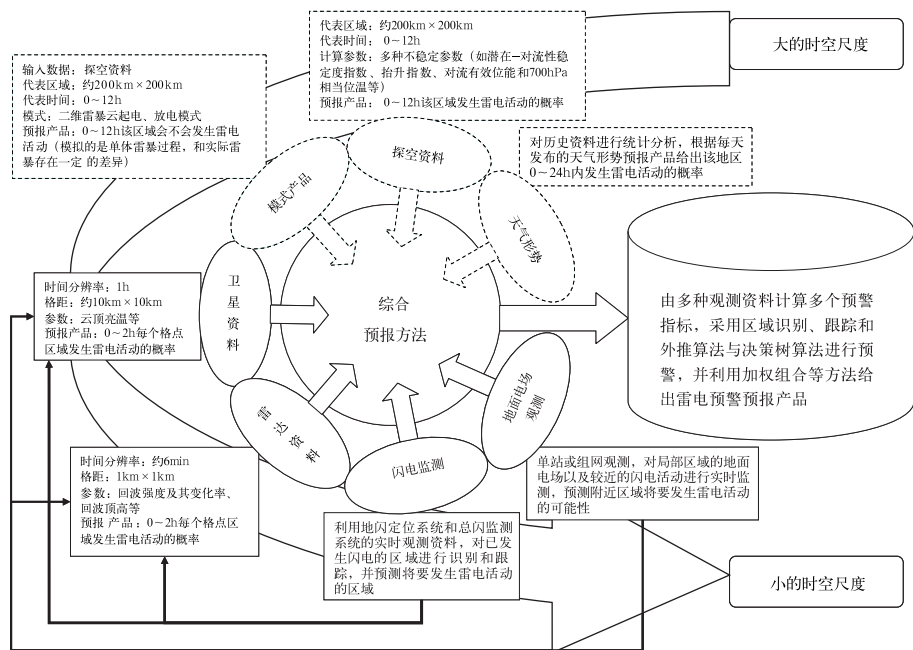


图 1 雷电临近预警方法的整体框架

在 CAMS-LNWS 中, 每种资料的应用都采用了独立的模块(如图 2 所示, 共 7 个单一资料应用模块和 1 个综合预报模块), 这样既容易实现不同模块之间的相互调用以及综合预报模块对子模块预报结果的调用, 也便于以后对预警方法的不断改进。对于不同的资料应用模块, 采用了不同的基础算法: 区域识别、跟踪和外推算法(Area Identification, Tracking and Extrapolating Arithmetic, AI-

TEA)被用于闪电、雷达和卫星资料应用模块以及综合预报模块, 把已经发生闪电的区域和有可能发生闪电的区域识别出来, 并利用多个时次的观测资料对这些区域进行跟踪和外推, 预测有可能发生闪电的区域; 决策树算法应用的前提是要有足够多的实例对该算法进行分类训练, 目前只是在探空资料应用模块中采用了该算法, 随着观测个例的增多, 决策树算法也能在其他模块中加以应用,

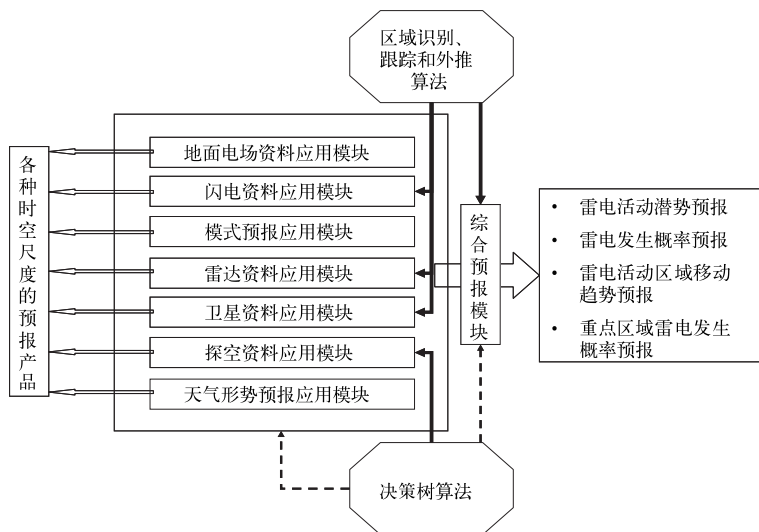


图2 雷电临近预警系统中的模块化设计

对各种预警指标进行遴选。

## 2 雷电临近预警方法流程

在 CAMS-LNWS 中,用户可以对预警区域范围、格点分辨率、参与预警的资料及其相对权重、每种资料预处理的有效时段、预警结果的时间长度和时段步长等参数进行设置,CAMS-LNWS 将根据用户的设置首先对相应的资料进行预处理,然后逐个利用单一资料进行雷电预警,最后再进行综合预警。

资料的预处理是保证雷电临近预警系统正常有效运行的前提,对于卫星和雷达资料(目前主要采用了卫星 TBB 产品和雷达反射率产品数据),每一个处于预处理有效时段内的数据文件,都根据用户设置的预警范围和格点分辨率进行重新格点化处理,在需要进行插值时采用的是双线性插值方法。而对于闪电实时监测资料,则还需指定预处理的时间步长,以生成多个时段的格点资料,每个格点的数据包括了该格点上对应时段内发生的闪电次数(地闪定位系统)或辐射源个数(SAFIR 干涉仪)以及闪电的类型。

另外,CAMS-LNWS 中天气形势预报产品、探空资料和模式预报 3 个应用模块给出的是雷电活动潜势预报结果,在雷电临近预警中主要起参考作用,这里不做详细介绍。CAMS-LNWS 允许用户根据历史统计结果和预报员的经验,设定整个预警区域在不同的天气形势条件下发生雷电活动的概率,供天气形势预报产品应用模块调用。探空资料应用模块中采用的是决策树算法,将另文论述。模式预报应用模块采用的模式是中国科学技术大学大气遥感实验室基于中国气象科学研究院积云数值模式的框架,考虑了感应和非感应起电参数化方案并集成双向随机放电模式建立起来的二维雷暴云起电、放电模式<sup>[9-10]</sup>,由探空资料提供的初始条件模拟是否会发生雷电活动。

## 3 区域识别、跟踪和外推算法及其应用

### 3.1 算法描述

AITEA 主要参考了由美国 NCAR 开发的 TITAN (Thunderstorm Identification, Tracking, Analysis, and Nowcasting) 系



统<sup>[11]</sup>、Munkres' Assignment Algorithm Modified for Rectangular Matrices<sup>[12]</sup> (有时也被称为 Hungarian 算法) 和 Holt 双参数线性指数平滑方法<sup>[13]</sup>等。

这里首先对区域(Area)进行定义,指的是有可能发生或已经发生闪电的区域,如回波强度超过某个阈值或云顶亮温低于某个阈值的区域等。为了使不同的应用模块能够采用统一的 AITEA, AITEA 采用了通用的接口设计,各种资料在经过预处理得到格点资料之后,再经过二值化处理(符合条件的格点取值为 1, 否则为 0)就可以利用 AITEA 进行识别、跟踪和外推, AITEA 的流程如图 3 所示。

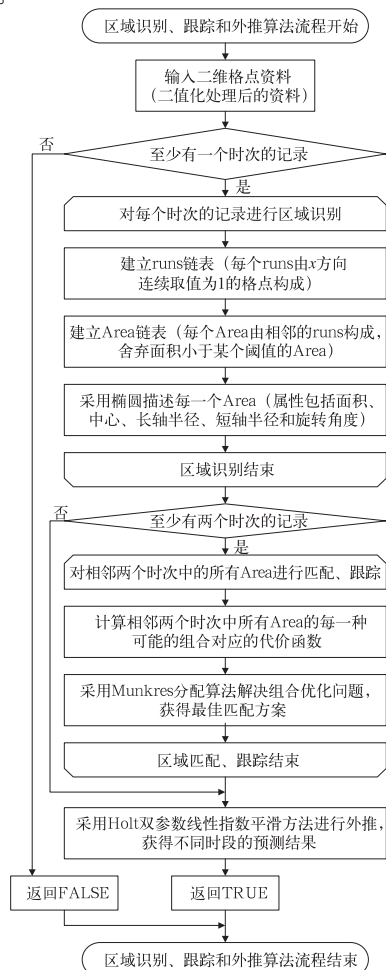


图 3 区域识别、跟踪和外推算算法流程

AITEA 首先对每个时次的格点资料进行区域识别,识别之后每个 Area 都采用椭圆来描述<sup>[11]</sup>。如果至少有两个时次的记录,就进行区域匹配。若相邻的两个时次  $t_1$  和  $t_2(t_1 < t_2)$  分别有  $n_1$  和  $n_2$  个椭圆(区域),则定义  $t_1$  时次的某个椭圆  $E_{1i}(1 \leq i \leq n_1)$  与  $t_2$  时次的某个椭圆  $E_{2j}(1 \leq j \leq n_2)$  之间的代价函数为

$$C_{ij} = w_1 d_P + w_2 d_A \quad (1)$$

其中:

$$d_P = [(x_{1i} - x_{2j})^2 + (y_{1i} - y_{2j})^2]^{1/2} \quad (2)$$

$$d_A = A_{1i}^{1/2} - A_{2j}^{1/2} \quad (3)$$

分别为椭圆中心位置  $(x, y)$  的差异和面积  $A$  引起的差异(统一成距离的量纲),  $w_1$  和  $w_2$  为权重系数。在计算代价函数时,需要考虑相邻两个时次相匹配区域的位置不可能差异过大,因此,在  $d_P/(t_2 - t_1)$  超过某个阈值时直接将代价函数  $C_{ij}$  赋为无效值。共有  $n_1 \times n_2$  个  $C_{ij}$  构成了一个代价函数矩阵,后面的过程就是一个组合优化问题的求解, AITEA 采用的是 Munkres 分配算法(具有多项式时间复杂度)<sup>[12]</sup>,能够得到一个最佳的匹配方案。对所有相邻时次进行同样的处理,就能获得每个椭圆(区域)的位置随时间的变化(可能会有一些区域新生或消失),即跟踪结果。

AITEA 采用 Holt 双参数线性指数平滑方法<sup>[13]</sup>对区域的中心位置坐标进行预测:

$$\begin{cases} S_t = \alpha R_t + (1 - \alpha)[S_{t-1} + b_{t-1} \Delta t_{t-1}] \\ b_t = \beta(S_t - S_{t-1})/\Delta t_{t-1} + (1 - \beta)b_{t-1} \\ F_F = S_t + b_t \Delta t_F \end{cases} \quad (4)$$

其中:  $S$  为平滑值,  $R$  为实测值,  $F$  为预测值,  $b$  体现了变化趋势,  $\alpha$  和  $\beta$  为权重系数,初始值为:  $S_0 = R_0$ ,  $b_0 = 0$ ,  $S_1 = R_1$ ,  $b_1 = (S_1 - S_0)/\Delta t_{1,0}$ 。预测结果中较新的实测值比时间更早的实测值拥有更大的权重,随着时间的前移,权重按指数规律递减,所以被称为指数平滑方法。改变式(4)中的预测时间长度  $\Delta t_F$  即可得

到不同时间的预测结果。目前,CAMS-LNWS只对区域中心位置的移动进行预测,区域大小变化的预测将在以后考虑。

### 3.2 算法的应用

CAMS-LNWS中既可以采用雷达在某一高度上的基本反射率也可以采用组合反射率来进行强回波区域的识别、跟踪和外推。对于不同类型的对流云,其回波强度的最低阈值是不一样的,最小面积以及最大移动速度的阈值也不尽相同<sup>[11]</sup>,CAMS-LNWS允许用户根据具体情况采用不同的设置。同样,在利用卫星TBB产品时,对流云区域的云顶亮温阈值、区域大小及其最大移动速度等参数也由用户指定。随着全国地闪定位站网和局部地区总闪定位系统的建设<sup>[14]</sup>,闪电资料在雷电临近预警中将起到越来越重要的作用。通过AITEA可以对已经发生闪电的区域进行识别,利用一段时间的监测资料就能进行跟踪和预测,特别是总闪定位系统能够提供云闪的信息,可为地闪提供更长的预警时间。这里以闪电资料应用模块为例来说明AITEA算法的具体应用,如图4(见彩页)所示。

2005年7月22日,受副热带高压边缘的偏南暖湿气流和西来的高空槽的共同影响,北京地区出现了大范围的降雨,并伴随较强的雷电活动。图4a(见彩页)给出由SAFIR干涉仪系统监测到的01:30—03:00(15min为一个时段)密云水库附近的闪电活动情况和利用AITEA得到的识别结果,图4b(见彩页)给出了利用AITEA根据01:30—02:15的闪电发生区域外推出的02:15—03:00期间可能发生闪电的区域范围。可以看到,AITEA对闪电区域的外推结果在0~30min内与实测结果还是比较一致的。利用地闪定位资料进行雷电临近预报实际上就是预测雷电活动区域的移动趋势,只

能靠提前预测雷电活动区域的位置信息来保证提前预警时间;而云闪一般会提前于地闪发生,其监测结果在一定程度上能够增加地闪的提前预警时间,在CAMS-LNWS中也考虑了此项预警指标。

## 4 多种资料组合预报方法

每种资料用于雷电预警都有其优势和不足,比如:闪电监测资料的实时性很好,但预警提前时间有限,并且,地闪定位资料相对来说比较离散(SAFIR干涉仪系统得到的辐射源定位资料要好一些);地面电场资料的实时性也很好,但单站的预警区域范围有限,对于移近的雷暴能够提前预警的时间也有限;雷达资料的时空分辨率都比较好,但只有在降水粒子形成之后才会有较强的回波,提前预警时间同样有限;卫星资料的空间尺度很大,可达上千千米,但目前能够得到的卫星资料的时空分辨率较粗,在雷电临近预警中的作用还有限;不同地区雷电活动的特征是不一样的,预报员的经验在雷电预报中的作用也不容忽视。因此,多种资料配合使用,取长补短,应该能够提高雷电预警预报的准确性,增加提前预警时间,下面将给出CAMS-LNWS综合利用多种资料进行雷电预警的方法。

以雷达资料应用为例,当雷达资料可用时,首先只采用雷达资料进行预警,采用如下预警指标:

(1) 双回波强度阈值:  $T_1(R_D)$  和  $T_2(R_D)$ ,  $T_1(R_D) < T_2(R_D)$ , 例如可分别选为 30dBz 和 45dBz。采用 AITEA 对雷达回波强度不低于  $T_1(R_D)$  的区域进行识别、跟踪和外推,在某区域中如果存在回波强度不低于  $T_2(R_D)$  的格点,则认为该区域有可能发生闪电,预警提前时间为  $t_F(R_D)$ 。

(2)  $T$  温度层高度上的回波强度阈值

$T(R_T)$ :首先采用 AITEA 对强回波区域进行识别、跟踪和外推,如果某个区域位置对应的  $T$  温度层高度  $H_T$ (由探空资料获得)上的基本反射率有超过  $T(R_T)$  的,则认为该区域有可能发生闪电,预警提前时间为  $t_F(R_T)$ 。 $T$  可取为  $-10^\circ\text{C}$ ,  $T(R_T)$  可取为 40dBz,对于地闪的预警,Gremillion 和 Orville 分析得到的  $t_F(R_T)$  为 7.5min<sup>[15]</sup>。

然后,结合其他资料进行组合预警:

(1) 如果有闪电定位资料可用,首先利用 AITEA 对强回波区域进行识别、跟踪和外推:

(a) 获得雷达资料最后一个实测时次对应时间段内每个格点上的闪电监测资料,包括是否有闪电,有闪电时记录其类型(只有云闪、只有地闪或者云闪和地闪都有)。

(b) 如果雷达资料最后一个实测时次的识别结果中某个区域内有地闪发生(有一个格点有),则该区域外推结果中所有时次以及区域内所有格点的雷电发生概率均设置为高概率值(可通过配置文件修改此概率值,下同)。

(c) 如果雷达资料最后一个实测时次的识别结果中某个区域内有闪电发生,但只有云闪发生,没有地闪,设云闪比地闪提前的时间为  $t(IC-CG)$ ,则该区域外推结果中外推时间超过(低于  $t(IC-CG)$ )的所有时次以及区域内所有格点的雷电发生概率均为高(低)概率。

(2) 如果有地面电场资料可用,首先利用 AITEA 对强回波区域进行识别、跟踪和外推:

(a) 由地面电场资料得到每个电场仪所代表区域内(5~10km 范围)各个预测时次的预测结果,主要考虑电场平均变化趋势和电场瞬时变化大小。

(b) 对所有预测时次的所有区域进行如下处理:搜索该时次该区域内所有格点由地面电场预测得到的雷电发生概率,该区域的

雷电发生概率取所有格点中雷电发生概率的最大值。

上述每个步骤对于每个格点的每个预测时次都能得到一个雷电发生概率,该模块预报的结果选其中的最大值。卫星资料可用时,与雷达资料的处理过程相似,只是采用 AITEA 识别、跟踪和外推的是低亮温区域。最后,对于每一个格点区域,采用指定的权重进行加权平均得到最终的雷电临近预警结果。在 CAMS-LNWS 中,虽然雷电活动潜势预报的结果并不参与雷电临近预警的计算,但用户在制作最终的预报结论时潜势预报结果也是重要的参考依据。

## 5 雷电临近预警产品

CAMS-LNWS 能够以多种形式表现雷电临近预警结果,如图 5(见彩页)所示。有两种是面向公众气象服务需求的产品:雷电发生概率预报产品(图 5a),即每个格点区域在每个预警时段内发生雷电活动的概率;雷电活动区域移动趋势预报产品(图 5b),给出了有可能发生或已经发生闪电的区域的位置(用椭圆来描述)、移动方向和速度(用箭头的方向和长度来描述)。另外,为了满足一些重要工程、重大社会活动等对雷电预警服务的专项气象服务的需求,CAMS-LNWS 还提供了重点区域雷电发生概率预报产品(图 5c),用户可以设置重点区域的个数、位置和大小(如图 5c 中设置了三个重点区域),CAMS-LNWS 会根据雷电发生概率预报的结果给出各重点区域内发生雷电活动的概率,并采用闪烁的标记来提醒用户注意。

## 6 结论和讨论

本文对 CAMS-LNWS 的临近预警方法进行了较为详细的讨论,该系统具有模块化

设计的特点,集成应用了多种观测资料 and 多种参数,利用了区域识别、跟踪和外推算法与决策树算法,考虑了闪电活动与云和降水关系的综合研究分析的成果,并具有丰富的人机交互功能。CAMS-LNWS 的预警方法填补了国内在综合应用地面电场仪、地闪定位仪、SAFIR 干涉仪、雷达、卫星和探空等观测资料以及天气形势预报产品和雷暴云起电、放电模式进行雷电临近预警方法研究的空白,CAMS-LNWS 将为我国雷电监测和临近预警预报的业务化提供一个基础平台,具有广阔的应用前景。关于 CAMS-LNWS 的实际业务运行试验以及应用和评估情况将另文讨论<sup>[16-17]</sup>。

但是,要想真正实现 CAMS-LNWS 的业务应用,还有很多工作需要开展。比如: CAMS-LNWS 的稳定性、兼容性等需要长期的实际应用来检验;目前的 CAMS-LNWS 对各种资料的应用、AITEA 的应用、模式的应用等还较为简单,如何充分应用各种资料提供的信息进行雷电预警、增强 AITEA 的功能(如 AITEA 处理区域分裂和合并现象的能力)以及拓展模式在雷电预报中的应用等等都需要深入地研究;另外,外推是 CAMS-LNWS 中一个重要的预测手段,随着预测时间的增加,其准确性会迅速降低,而专家系统和显式雷暴模式相对来说要好一些。因此,在 CAMS-LNWS 中不断增加其他预报方法,提高其准确性,增加其预警有效时段,也是后续工作中需要仔细考虑的。

## 参考文献

- [1] Roeder W P, and Pinder C S. Lightning Forecasting Empirical Techniques for Central Florida in Support of America's Space Program[C]. In 16th Conference on Weather Analysis and Forecasting, 1998, 475-477.
- [2] Smith S B. How Soon Can a Thunderstorm be Identified? A Comparison of Satellite-Observed Cloud Top Cooling and the Onset of Cloud-to-Ground Lightning[C]. In 18th Conference on Severe Local Storms, 1996, 479-482.
- [3] Hondl K D and Eilts M D. Doppler Radar signatures of developing thunderstorms and their potential to indicate the onset of cloud-to-ground Lightning[J]. Monthly Weather Review, 1994, 122: 1818-1836.
- [4] 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.
- [5] 许小峰,郭虎,廖晓农,等. 国外雷电监测和预报研究[M]. 北京: 气象出版社,2003.
- [6] Kawasaki Z I, Yamamoto K Matsuura K, et al. SAFIR operation and evaluation of its performance. Geophysical Research Letters, 1994, 21: 1133-1136.
- [7] 郑栋,张义军,吕伟涛,等. 大气不稳定性参数与闪电活动的预报[J]. 高原气象,2005,24(2): 198-203.
- [8] 孟青,吕伟涛,姚雯,等. 地面电场资料在雷电预警技术中的应用[J]. 气象,2005,31(9): 30-33.
- [9] 马明. 雷电与气候变化相互关系的一些研究[D]. 博士学位论文,中国科学技术大学,2004.
- [10] 谭涌波. 闪电放电与雷暴云电荷、电位分布相互关系的数值模拟[D]. 博士学位论文,中国科学技术大学,2006.
- [11] Dixon M, and Wiener G. TITAN: Thunderstorm identification, tracking, analysis, and nowcasting—A radar-based methodology[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 1993, 10: 785-797.
- [12] <http://csclab.murraystate.edu/bob.pilgrim/445/munkres.html>[OL].
- [13] 徐国祥. 统计预测和决策[M]. 上海财经大学出版社,2005.
- [14] 许小峰. 雷电灾害与监测预报[J]. 气象,2004,30(12): 17-21.
- [15] Grenillion M S and Orville R E. Thunderstorm characteristics of cloud-to-ground lightning at the Kennedy Space Center, Florida: A study of lightning initiation signatures as indicated by the WSR-88D. Weather and Forecasting, 1999, 14: 640-649.
- [16] 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.
- [17] 马颖,孟青,吕伟涛,等. 雷电临近预警产品评估方法及其软件[J]. 气象(待发表)

# 吕伟涛等：雷电路近预警方法和系统研发

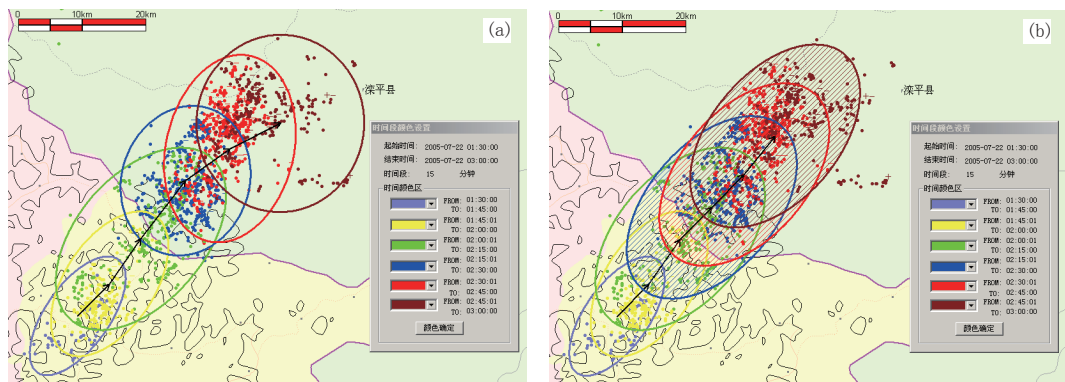


图 4 AITEA算法在闪电电测资料应用模块中的应用示例

(a) 闪电监测资料的时空分布以及AITEA的识别和跟踪结果；  
(b) 闪电监测资料的时空分布以及AITEA的识别、跟踪和外推结果  
(闪电监测资料采用的是SAFIR辐射源定位资料；不同颜色代表不同时间段；空圈椭圆为识别结果，有斜线填充的椭圆为外推结果)

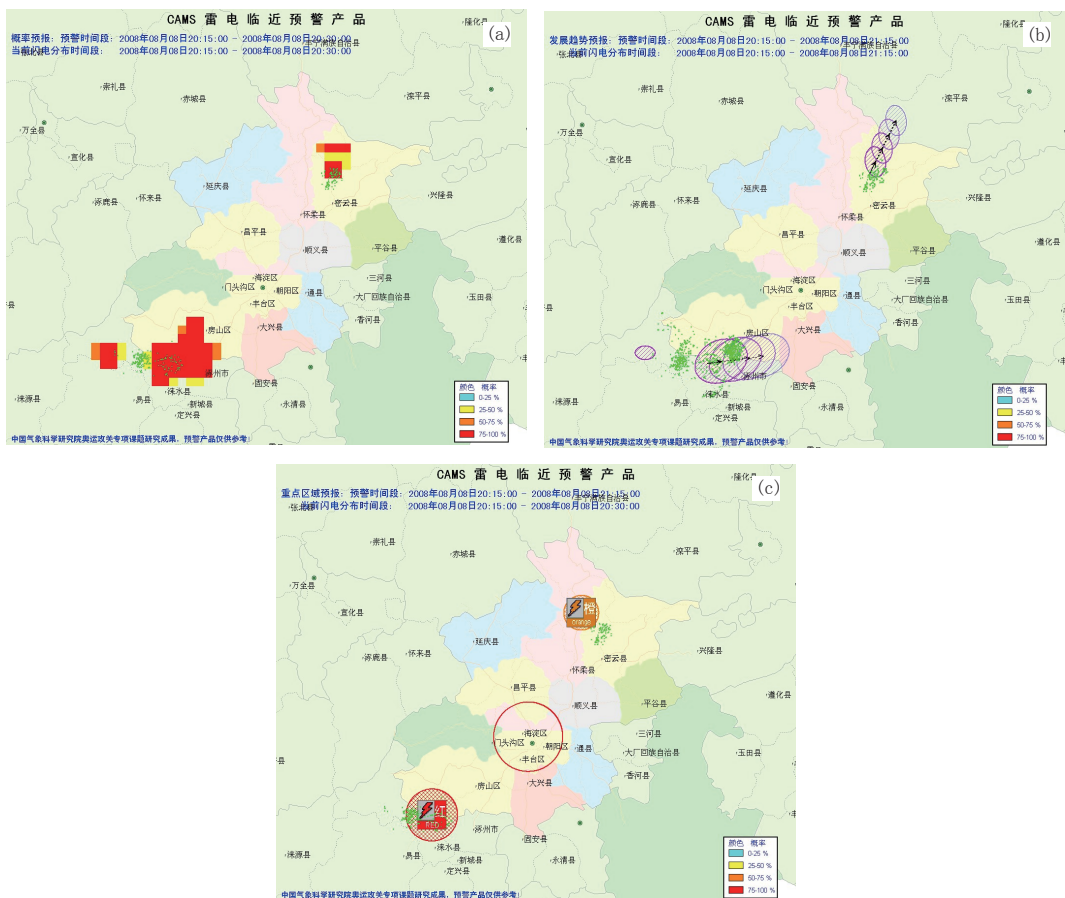


图 5 雷电路近预警产品示例

(a) 格点区域雷电发生概率预报结果示例；(b) 雷电活动区域移动趋势预报结果示例；  
(c) 重点区域雷电发生概率预报结果示例  
(绿色的标记为预警时间段内闪电监测系统的观测结果)