

安徽省强对流天气短时临近预警服务系统设计 ——以铁路货运服务为例

■ 张蕾 姚叶青 丁国香 张曼义

设计开发基于多普勒天气雷达资料和改进光流法的安徽省强对流天气短时临近预警服务系统，并已在合肥铁路货运气象服务中投入业务运行。该系统实现了0~1 h的雷达回波外推和雷暴大风外推预报产品的实时生成，提供雷达回波外推和雷暴大风外推预报产品以及大风实况的展示功能，并制定了强对流天气预警方案和预警短信靶向发布策略，实现强对流天气预警短信自动发布功能。

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2023.05.011

强对流天气对交通运输、电力、旅游等行业具有重大影响。在安徽省的强对流天气中，雷暴大风出现频率最高，也最易漏报，是重要的灾害性天气之一，每年都会造成较大的经济损失和人员伤亡，因此针对强对流天气尤其是雷暴大风天气建立短时临近预报预警服务具有重要意义。

目前国内外建立了许多强对流天气短时临近预报技术和业务系统，美国国家大气科学研究中心(NCAR)发展了ANC(Auto Nowcaster)临近预报系统，进行0~2 h临近预报；英国的GANDOLF(Generating Advanced Nowcasts for Deployment in Operational Landsurface Flood Forecasts)预报系统融合雷达外推预报与中尺度模式预报，提供0~6 h预报。张小玲等总结了我国强对流天气预报业务发展历程，指出我国的强对流临近预警技术主要依赖以雷达回波为主的外推预报技术。中国气象局2007年底开始大力建设强对流天气临近预报业务系统SWAN(Severe Weather Automatic Nowcast System)，目前3.0版本已正式向全国推广试用。王啸华等介绍了江苏省强天气综合报警追踪平台(SWATCH)功能，平台整合了PUP、SWAN等业务系统中风暴识别和外推相关的核心产品。

强对流天气短时临近预报预警在专业气象服务中的需求也越来越被重视，美国The Weather Company的TWC平台集成卫星、雷达、数值模式、闪电等数据，整合用户和行业数据，为用户提供任意地点的最新预报数据。AccuWeather的MinuteCast™系统融合雷达和高分辨率的天气数据，利用专利技术对未来2 h做出逐

分钟的降水预报。李帅等将多普勒气象雷达三维拼图技术融合河南电网GIS，实现覆盖河南电网的0~2 h强对流天气预警。张涛设计了航空气象服务系统，实现对自动气象观测系统、多普勒天气雷达系统、航空气象报文、卫星云图等不同产品资料的采集、处理、集成和显示。薛冰等将雷达回波外推技术应用到铁路交通气象服务中。冯蕾等初步探索了铁路横风监测预报的技术方法。

本文基于专业气象服务中对雷暴大风预报产品的需求，研发了雷暴大风外推预报关键技术，制订了强对流天气预警信息靶向发布策略，建设了安徽省强对流天气短时临近预警服务系统。目前该系统已在合肥铁路货运气象服务中投入业务运行，为铁路货运气象保障提供有力的技术支撑。

1 系统设计与开发

安徽省强对流天气短时临近预警服务系统总体采用C/S、B/S混合架构，基于WebGIS技术、多线程技术、数据库等技术实现了强对流天气尤其是雷暴大风天气预报产品展示以及自动预警功能。

1.1 系统结构

系统设计了数据层、业务逻辑层和Web表现层三层逻辑框架。数据层是系统的底层，负责系统所需数据的存储，为整个系统提供数据源保障，主要功能包括从全国综合气象信息共享平台(CIMISS)获取大风实况数据、从服务器获取雷达拼图数据以及从mysql获取历史大风警报信息，系统采用云存储技术对多源

收稿日期：2022年3月10日；修回日期：2022年9月14日

第一作者：张蕾(1990—)，Email: 565496771@qq.com

资助信息：国家重点研发计划项目(2018YFC1507800)；安徽省气象局创新发展专项(CXM202111)

异构数据进行集中化管理，统一为外部服务使用，无需考虑数据源。业务逻辑层作为数据层与应用层之间的桥梁，主要实现数据的分析处理，该层通过独立的后台数据支撑系统开发完成，主要功能包括雷达拼图和大风数据读取、数据质量控制、雷达拼图外推以及雷暴大风外推预报算法实现。Web表现层是系统框架顶层，主要通过浏览器与用户进行交互，利用Python、JavaScript、WebGIS、ASP.NET、Node.js信息推送技术等实现雷达回波、雷暴大风等气象要素的展示、强对流天气的监控和预警信息推送等功能，系统主要架构如图1所示。

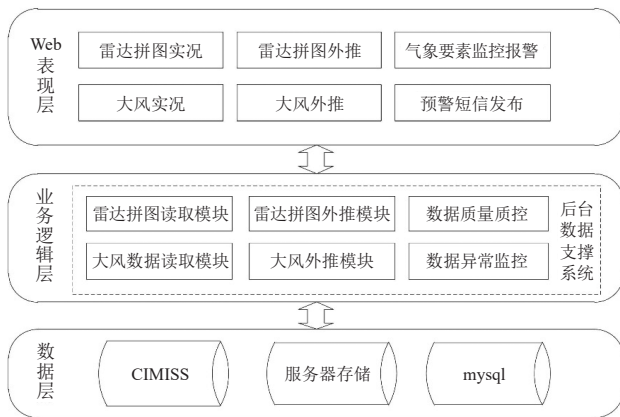


图1 安徽省强对流天气短时临近预警服务系统架构图

1.2 系统主要功能

系统分为前台综合展示系统和后台数据支撑系统两大部分，前台综合展示系统采用B/S架构，并利用ASP.NET技术完成Web系统的开发；后台数据支撑系统采用C/S架构开发完成，并利用VS 2012 (MFC)进行客户端界面开发，系统将后台数据支撑系统独立出来便于数据运算处理以及预报产品的升级更新。

系统主要包括数据处理、气象要素展示、配置管理和预警发布4大功能模块。

1) 数据处理模块：通过后台数据支撑系统处理完成，实现0~1 h雷达回波外推和雷暴大风外推产品的实时生成。模块还提供数据异常监控功能，实时监控数据及时性和准确性，保障前台综合展示系统稳定运行。

2) 气象要素展示模块：实现雷达回波外推预报产品、雷暴大风外推预报产品以及大风实况数据实时查询和展示，可实时掌握天气过程的发展演变趋势，辅助判断强对流天气的发生和影响。另外系统还提供历史数据查询功能，便于对历史天气的回顾总结以及评分检验。

3) 配置管理模块：从强对流天气报警阈值设置和短信发送群组配置两个方面配置预警信息发布条件，

实现可定制化的预警短信发布。强对流天气报警阈值设置主要对雷达回波、大风外推预报和大风实况报警阈值等进行配置，短信发送群组配置可配置关注的目标点信息并与通讯录关联，向定制用户发送关注目标点预警信息。

4) 预警发布模块：预警发布主要从系统报警声音提示和预警短信发布两方面设计。当气象要素值达到设置的报警阈值，系统列出报警信息并发出声音提示，同时触发报警短信并发送相关人员。

2 关键方法研究

2.1 雷达回波外推方法

雷达回波外推方法基于安徽省雷达组合反射率因子拼图实现，系统采用计算简便且预报效果较好的光流法来计算相邻时次雷达回波图像间运动矢量，再通过线性外推方案外推0~1 h雷达回波图像。雷达回波外推预报产品时间分辨率为6 min，空间分辨率为0.01°，预报时效为1 h。

光流法在1950年由Gibson首先提出，是计算机视觉领域应用较为广泛的方法，目前在气象学领域也有一定的应用。光流法假设回波运动在短时间内满足拉格朗日守恒方程，并引入其他的约束方程来求解光流场。假设在*t*时刻(*x*, *y*)处雷达反射率因子值为*I*(*x*, *y*, *z*)，经过*dt*时刻该点的反射率因子值变为*I*(*x*+*dx*, *y*+*dy*, *z*+*dz*)，当*dt*→0时，认为*I*值近似不变，即：

$$I(x, y, t) = I(x + dx, y + dy, t + dt), \quad (1)$$

假设移动足够小，将(1)式右边按泰勒级数展开，略去二阶无穷小项，可导出：

$$\frac{\partial I(x, y, t)}{\partial t} + \frac{\partial I(x, y, t)}{\partial x} \frac{dx}{dt} + \frac{\partial I(x, y, t)}{\partial y} \frac{dy}{dt} = 0, \quad (2)$$

式中： $\frac{dx}{dt} = u$ 、 $\frac{dy}{dt} = v$ 表示回波在*x*、*y*方向上的运动速度。

令 $I_t = \frac{\partial I(x, y, t)}{\partial t}$ 、 $I_x = \frac{\partial I(x, y, t)}{\partial x}$ 、 $I_y = \frac{\partial I(x, y, t)}{\partial y}$ ，表示*I*的时间、空间梯度。则上式可表示为：

$$I_x u + I_y v = -I_t. \quad (3)$$

上式中有两个未知数，因此需要引入其他约束方程来求解。系统采用Lucas和Kanade提出的约束方程即LK算法求解回波移速。

基于光流法假设条件，该方法只适用于回波间运动较小的情况，对移速较快的回波反演误差较大，因此引入金字塔分层技术改进传统光流法，减小由于回波移速较快造成的反演误差，提高外推预报精度。

试验发现，随着外推时间步长的增加，外推得到的回波逐渐变得散乱不连续，因此对光流场进行水平

无辐散处理,得到新的光流场,用新的光流场外推得到的雷达回波图像平滑性和连续性都较好。

2.2 雷暴大风外推预报方法

雷暴大风外推预报方法基于安徽省高密度分钟级雷暴大风实时监测数据,采用雷暴大风与雷达回波的动态匹配策略,识别可能出现雷暴大风的风暴单体,再通过光流法得到风暴单体的移动方向和速度,外推得到未来1 h可能产生雷暴大风的区域。雷暴大风外推预报产品时间分辨率为6 min,空间分辨率为 0.01° ,预报时效为1 h。

雷暴大风与雷达回波的动态匹配策略为首先识别出雷达图像中的风暴单体,再结合大风实况,当风暴单体对应的时次中有大风天气出现,则认为风暴单体与雷暴大风天气对应。本文定义组合反射率图像上雷达反射率因子强度 ≥ 35 dBZ,且面积 ≥ 64 km²的一片连续回波区为一个风暴单体。

为了将极大风速和雷达回波进行动态匹配,还需要对极大风速实况数据进行处理使其与雷达回波图像时空匹配。获取逐6 min内所有时次极大风速最大值作为6 min的极大风速值,采用克里金插值法对安徽省自动气象站极大风速进行插值得到空间分辨率为 0.01° 的格点数据,使得极大风速数据与雷达拼图数据时空分辨率一致。

2.3 强对流天气预警发布策略

2.3.1 强对流天气预警指标

系统基于0~1 h雷达回波外推、雷暴大风外推产品和大风实况数据,选取合适的阈值对雷暴大风、其他类型强对流天气和实况大风三种类型进行预警,具体预警指标设计如表1。

表1 安徽省强对流天气短时临近预警服务系统强对流天气预警指标设计

预警类型	预警指标	预警内容
强对流天气	雷暴大风 $R_f \geq 45$ $V_f \geq 17.2$	某地,未来某分钟内将出现雷电、短时强降水等强对流天气,并伴有7级以上大风
	其他 $R_f \geq 45$ $V_f < 17.2$	某地,未来某分钟内将出现雷电、短时强降水等强对流天气
实况大风	$V_f \geq 17.2$	某地,即将出现大风天气

注: R_f 为雷达反射率因子预报值(dBZ); V_f 为极大风速实况(m/s),强对流天气分类中 V_f 为用于识别风暴单体的阈值。

为了方便对指标进行修正,用户可根据经验自行配置预警指标。

2.3.2 预警短信靶向发布

预警短信发布按照将预警信息优先发送给最需要的人群的设计思想,提出了运用基于特定区域、人群以及预警信息内容的靶向技术进行精准发布的推送策

略。通过融入雷达回波外推、雷暴大风外推预报以及大风实况监测等辅助研判数据,以及行业用户责任人信息、所在分组、关注的目标点位置,实现灾害性天气快速研判以及预警信息分点、分级、分众的精准靶向发布。

为了提高预报预警的准确率,设置报警缓冲区半径,如果目标点缓冲区范围内出现达到预警指标的情况,则对目标点进行预警。业务人员可根据经验调整缓冲区半径,提高预警准确率,尽可能避免灾害性天气的漏报。

为了提高预警短信发送效率,系统导入行业用户责任人信息、所在分组并关联关注的目标点。当目标点达到设置的气象要素阈值时系统根据关联的短信群组自动发送强对流天气预警短信,实现可定制化的预警短信发布,同时通过责任人所在分组,判断短信发送的优先级,确保将预警信息优先发送给最需要的人群。为了避免短信重复发送,系统可设置不重复发送短信时间。

3 系统应用与检验

安徽省强对流天气短时临近预警服务系统于2019年6月在合肥铁路货运气象服务中正式应用,运行稳定、效果良好,以铁路货运的应用情况为例介绍系统的预警服务效果,系统显示界面如图2所示。

系统显示界面分为三大区域(图2三处红色方框区域):最左侧是大风目标点报警区域,该区域可列出预报雷暴大风等强对流天气的位置和时间;中间是雷达回波和大风图像展示区域;最右侧是配置管理区域,用来查看需要展示的图像、设置目标点阈值以及配置管理人员信息等操作。

2020年8月20日安徽省江淮之间和淮北东部地区发生雷暴大风天气,阵风普遍达到7~8级,26个自动气象站阵风达到9级以上,12个站点超过10级。18:30(北京时,下同)左右合肥地区发生强对流天气,自动气象站监测到货运公司肥东某货场上游区域风力较大,阵风超过6级,18:30系统基于雷达强回波对货场强对流天气进行预警,18:38货场上游10 km左右处肥东站极大风速达到19.5 m/s,18:42系统预报该货场将出现7级以上雷暴大风天气(图3),并发送预警短信。

2022年7月26日凌晨安徽多地发生强对流天气,01:30左右雷达回波图上显示一块对流云团正自西向东往六安方向移动,01:48系统对六安叶集区货场发布强对流天气预警短信,之后回波继续东移并与其他对流云团合并,先后影响六安、合肥、马鞍山等地,系统均及时发布预警短信。06:30左右一爬线系统向

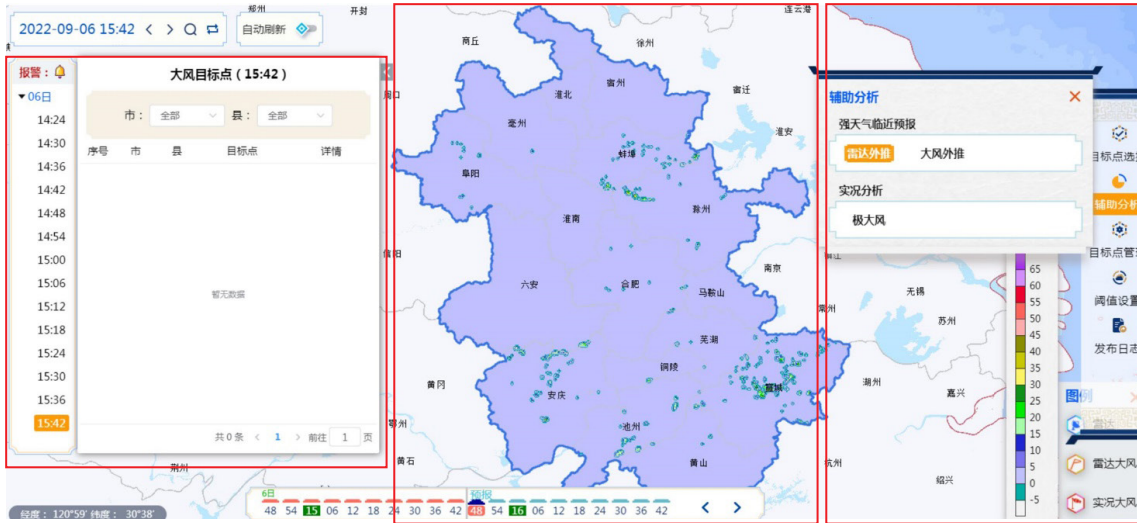


图2 安徽省强对流天气短时临近预警服务系统显示界面

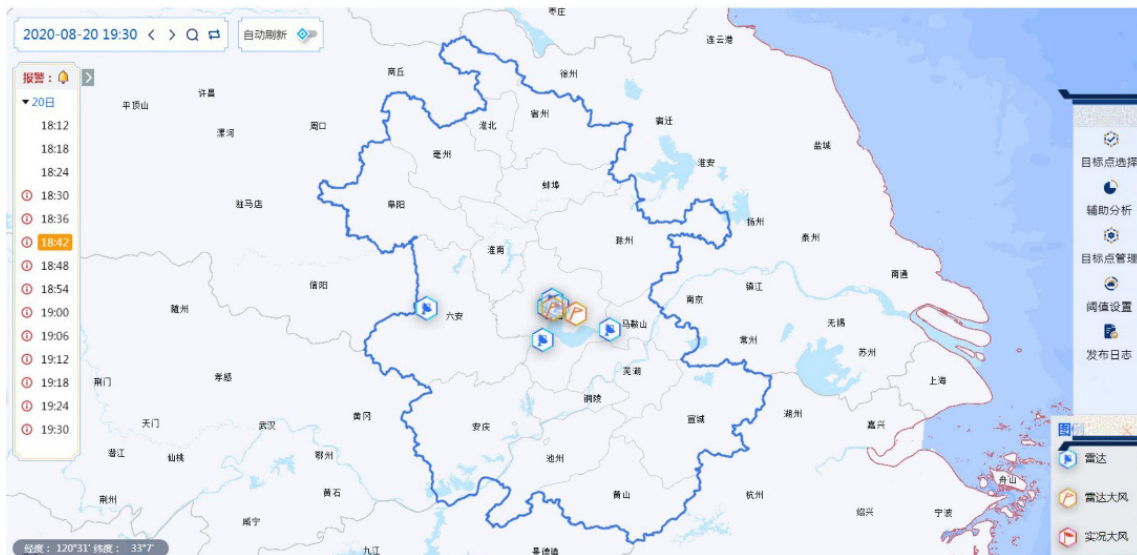


图3 2020年8月20日18:42安徽省强对流天气短时临近预警服务系统强对流天气报警显示页面

六安方向移动，08:00飚线后部到达安庆，08:30系统提前向安庆太湖县货运站点发布强对流天气预警，之后又先后向安庆三个受影响的货运站发出雷暴大风预警。从大风实况来看，08:30左右安庆境内开始出现7~8级以上雷暴大风天气，08:47太湖县货运站上游10 km左右太湖花亭湖站出现26.4 m/s大风，08:48系统预报该货场将出现9级以上雷暴大风天气，09:03离货场最近的太湖小池站出现8级以上大风。

上述个例均表明系统能较好地预报雷暴大风等强对流天气，并及时对用户进行预警，另外系统基于强回波能够更早地进行强对流天气预警，对强对流天气临近预报预警服务具有重要作用。为了进一步检验短信预警效果的准确性，对30个铁路货运站点2020年4月—2021年12月雷暴大风预警发布情况进行检验。选

择货运站5 km半径范围内所有自动气象站小时数据，如果预警短信发送时次1 h内自动站出现雷暴大风天气，则认为预报正确。本文结合闪电定位仪资料，将小时极大风速超过17.2 m/s并伴有闪电现象发生的天气过程记为雷暴大风天气。采用命中率(POD)、临界成功指数(CSI)和空报率(FAR)来评价预警短信发送效果。经统计检验，30个货运站点共预报雷暴大风天气219次，其中89次出现雷暴大风天气，有9次漏报，POD达到0.908，FAR为0.583，CSI为0.39。检验结果表明，系统能够准确及时地发送雷暴大风预警短信，但是空报率较高，在今后应当进一步研究强对流天气预报方法和预警发送策略，减少虚警率，提升预报准确性。

4 结论

安徽省强对流天气短时临近预警服务系统利用改进的光流法作为雷达回波和雷暴大风外推的关键方法,得到强对流天气尤其是雷暴大风天气短时临近预报产品,实现预报产品实时展示和强对流天气预警信息发布功能,形成了“技术+策略+平台”的强对流天气短时临近预警服务体系,为行业气象服务提供重要的技术支撑。系统主要特点如下。

1) 基于改进光流法实现0~1 h雷达回波外推和雷暴大风外推预报产品实时生成,提高强对流天气临近预报产品精细化水平及准确性。

2) 系统具有较高的自动化水平,在一个业务系统中实现了监测、预报、预警等强对流天气短时临近预报服务产品的数据处理、展示和预警短信发布功能。

3) 系统采用C/S和B/S混合架构,在C/S层面通过多个独立模块完成数据处理和数据异常监控,在B/S层面完成产品展示和短信预警发布,易于系统升级维护。

今后将对雷达回波和雷暴大风外推产品预报效果进行实时检验,针对发现的问题,结合机器学习等新

技术研发强对流天气短时临近预报新方法,提高预报准确率。

深入阅读

- 陈石定,刘翔,向立莉,2019. 靶向技术在预警信息发布中的应用. 计算机应用,39(S1): 88-92.
- 冯蕾,陈仲榆,郝淑会,等,2017. 铁路(高铁)横风监测预报技术方法初探. 气象科技进展,7(1): 138-142.
- 王啸华,郑媛媛,濮梅娟,等,2018. 强天气综合报警追踪平台功能设计及龙卷预警中的应用. 气象科技进展,8(3): 61-69.
- 薛冰,鹿业涛,渠寒花,2013. 铁路交通气象服务系统的设计与开发. 电子测试,(20): 24-26.
- 张涛,2018. 航空气象服务系统的设计与实现. 郑州: 郑州大学.
- 张蕾,魏鸣,李南,等,2014. 改进的光流法在回波外推预报中的应用. 科学技术与工程,14(32): 133-137.
- 张小玲,杨波,盛杰,等,2018. 中国强对流天气预报业务发展. 气象科技进展,8(3): 8-18.
- 钟利华,曾小团,胡宗煜,等,2009. 桂林雷暴大风临近预报研究. 气象研究与应用,30(z2): 79-80.
- Gibson J J, 1979. The ecological approach to visual perception. Boston: Houghton Mifflin.
- Lucas B D, Kanade T, 1981. An iterative image registration technique with an application to stereo vision (darpa). Proceedings of the 1981 DARPA Image Understanding Workshop.

(作者单位: 安徽省公共气象服务中心)

(上接61页)

险评估方法,形成针对当地各重点行业的、基于现有天气预报技术水平和乡镇分辨率的易损度的气象灾害风险评估方法,有一定实用性。本方法的关键是各行业、各种类天气危险度评估的临界气象条件指标体系,临界值需要在实践中不断检验,必要时进行订正。

现有气象灾害风险评估的内容比较广泛,主要是在致灾因子危险性评估、承灾体脆弱性评估的基础上进行气象灾害风险评估和区划^[22];业务化应用一类是灾后综合评估一次灾害天气过程对各行业的综合影响^[23],另一类是结合天气预报,以风险评估技术为基础,支撑气象灾害风险预警服务业务^[18, 24]。本文以简化的风险评估方法开展阳泉市的行业气象服务工作,不足之处是易损度空间分布的精细化程度还有待提升^[25]。

参考文献

- [1] 吴吉东,傅宇,张洁,等. 1949—2013年中国气象灾害灾情变化趋势分析. 自然资源学报,2014,29(9): 1520-1530.
- [2] 中国国际减灾十年活动回顾——中国国际减灾十年委员会副主任多吉才让在2000年国际减灾日座谈会上的讲话. 中国减灾,2000(4): 9-12.
- [3] 章国材. 气象灾害风险评估与区划方法. 北京: 气象出版社,2010.
- [4] 陈海燕,雷小途,潘劲松,等. 气象灾害风险评估业务发展研究. 气象科技进展,2018,8(4): 15-21.
- [5] 周洪建. 我国灾害评估系统建设框架与发展思路——基于尼泊尔实地调查的分析. 灾害学,2017,32(1): 166-171.
- [6] 刘小艳,孙娟,杜继稳,等. 气象灾害风险评估研究进展. 江西农业

学报,2009,21(8): 123-125.

- [7] 张建萍. 阳泉市郊区地质灾害易发程度分区及评价. 华北国土资源,2004(1): 7-10.
- [8] 沈勇. 关于山西地质灾害调查与区划的思考. 科技情报开发与经济,2003(12): 183-184,225.
- [9] 章国材. 暴雨洪涝预报与风险评估. 北京: 气象出版社,2012.
- [10] 陈振林. 上海气象影响预报和风险预警技术导则. 北京: 气象出版社,2017.
- [11] 李良福,覃彬全,杨磊,等. 气象安全生产事故风险管理与实践. 北京: 气象出版社,2016.
- [12] 周月华,彭涛,史瑞琴. 我国暴雨洪涝灾害风险评估研究进展. 暴雨灾害,2019,38(5): 494-501.
- [13] 温克刚,刘庆桐. 中国气象灾害大典山西卷. 北京: 气象出版社,2005.
- [14] 中国气象局. 气象灾害管理系统. 北京: 中国气象局,2019.
- [15] 黄崇福. 自然灾害风险分析的基本原理. 自然灾害学报,1999,8(2): 21-30.
- [16] 柳艳香,潘进军,田华,等. 高速公路交通气象灾害风险评估方法简介. 气象科技进展,2017,7(6): 18-21.
- [17] 柳艳香,郜婧婧,李嵩恂,等. AHP法不同行业专家咨询结果差异的对比分析. 公路,2017,62(6): 186-192.
- [18] 潘进军,柳艳香,田华,等. 高速公路交通气象灾害风险评估、区划与预警. 北京: 科学出版社,2019.
- [19] 薛晔,黄崇福. 自然灾害风险评估模型的研究进展. 应用基础与工程科学学报,2006,14(增刊): 1-10.
- [20] 赵思健,黄崇福,郭树军. 情景驱动的区域自然灾害风险分析. 自然灾害学报,2012,21(1): 39-17.
- [21] 孙建林,康永林,张新明. 采用层次分析法(AHP)综合评价轧制油(I)——层次分析法简介. 润滑与密封,2000(6): 59-60.
- [22] 王国复. 气象灾害调查与风险评估. 城市与减灾,2021(2): 5-9.
- [23] 中国气象局. 气象灾害风险评估技术规范 冰雹(QX/T511-2019). 北京: 气象出版社,2011.
- [24] 谢五三,宋阿伟,田红. 中小河流域暴雨洪涝灾害风险评估及效果检验. 气象科学,2018,38(2): 264-270.
- [25] 李颖,赵伟,程瀛. 乡镇级气象灾害风险评估方法研究:以永嘉县为例. 浙江气象,2018,39(1): 38-42.