

Forecasting of Flash-Flood-Producing Precipitation by Coupling Multiple Sources of Information

Ming Xiong¹, Wenfa Yang¹, Jun Li², Beiping Zhou³, Li Zi¹

¹Bureau of Hydrology, Changjiang Water Resources Commission, Wuhan Hubei

²Wuhan Institute of Stormrain Research, China Meteorological Administration, Wuhan Hubei

³Nanjing University of Information Engineering, Nanjing Jiangsu

Email: xiongm@cjh.com.cn

Received: Mar. 20th, 2017; accepted: Apr. 11th, 2017; published: Apr. 14th, 2017

Abstract

The precipitation forecasts from radar and satellite cloud pictures (with a lead time of 0 - 2 h), from upper air and ground surface atmospheric sounding (with a lead time of 0 - 24 h) and from numerical forecasting mode (with a lead time of 0 - 72 h) have different forecast effect in different forecast periods. Considering the short lead time and low accuracy forecast for early warning of mountain torrents, study on the numerical forecasting model, the model's optimized combination of parameters, data assimilation, correcting the errors on forecasted rainfall in flash-flood affected region and an optimized calculating method based on big data for radar monitoring precipitation. Linxiang City of Hunan Province was selected as experimental area and the results show that the WRF numerical forecast is more suitable for the forecast of disasters including mountain torrents. Among them, WSM6 cloud microphysical process, Grell-Devenyi ensemble convective parameterization scheme and YSU boundary layer parameter configuration scheme can greatly simulate the process of mountain torrents and storm causing a flood, precipitation deviation correction method based on frequency (or area) match can considerably improve the systematic deviation in the rainfall and scope of rain area in the precipitation forecast, the big data analysis method used in radar rainfall forecast can remarkably improve the accuracy. A forecasting disastrous flash floods method has been proposed by coupling upper air and ground surface atmospheric sounding, the 0 - 72 h short-term quantitative precipitation forecasts (QPF) from numerical forecasting mode and the 0 - 2 h nowcast QPF based on radar, which helps to increase the lead time of flash flooding forecasts from 2 h to 72 h and enhance significantly the forecasting accuracy.

Keywords

Disastrous Flash Flooding, Radar, Numerical Weather Forecasting, Coupling

*特邀论文。

作者简介: 熊明, 男, 教授级高级工程师, 主要从事水文水资源研究。

多元信息耦合的致灾山洪降雨预报方法

熊明¹, 杨文发¹, 李俊², 周北平³, 訾丽¹

¹长江水利委员会水文局, 湖北 武汉

²中国气象局武汉暴雨研究所, 湖北 武汉

³南京信息工程大学, 江苏 南京

Email: xiongmi@cjh.com.cn

收稿日期: 2017年3月20日; 录用日期: 2017年4月11日; 发布日期: 2017年4月14日

摘要

雷达预估信息(0~2 h)、数值天气预报产品(0~72 h)及基于高空和地面大气探测资料的综合预报信息(0~24 h)在不同预见期的降雨预报各有差异, 预报效果上各有优劣, 而针对山洪的预报存在准确率低、预警有效时间短等问题, 研究面向山洪灾害防治区的数值预报模式的选取、模式最优物理参数化组合方案、同化方案、降水偏差订正技术以及基于大数据的自分型雷达估测降水最优化算法。以湖南临湘市为试验区进行验证, 结果表明: WRF中尺度数值模式适用于山洪灾害降雨预报, 其WSM6云微物理过程、Grell-Devenyi ensemble对流参数化方案和YSU边界层参数方案对致洪山洪暴雨过程模拟较好, 基于频率(或面积)匹配的降水偏差订正方法能显著改善模式降水预报中雨量和雨区范围的系统性偏差, 大数据分析应用于雷达估测降雨能显著提高准确度。在此研究基础上, 提出了基于高空和地面大气探测、数值预报模式的0~72 h短期定量降雨预报和基于雷达的0~2 h临近定量降雨预报的多元信息耦合预报方法, 将对致灾山洪的预报时间由2 h延长至72 h, 并可显著提高了山洪预报的精度。

关键词

致灾山洪, 雷达, 数值天气预报, 耦合

Copyright © 2017 by authors and Hans Publishers Inc.

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

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



Open Access

1. 引言

山洪灾害诱发原因较多, 但暴雨量绝对是最主要的诱因。目前, 在山洪灾害预报方面均依据地面实测雨量或雷达估测降水量信息[1], 地面实测雨量没有预见期, 较准确的雷达估测降水预见期一般不超过3 h [2] [3], 导致山洪灾害预警时间短, 且完善的山洪灾害预报方法缺乏。由于山洪灾害一般发生在流域面积较小的河流甚至在山体坡面, 其产汇流过程极短, 往往起不到预警作用。

20世纪70年代以来, 雷达估测降水方法发展迅速, 但大多考虑降水类型和地理位置等影响[4]。由于山体对雷达的阻挡, 使得地形复杂、海拔较高地区常常成为雷达测量的盲区, 雷达估测降水较少考虑到海拔高度这一因素[5]。而地形复杂的山区常常是山洪、泥石流等灾害发生的高频区, 降水随海拔高度的变化呈现不同的变化趋势, 故较少有将雷达估测降水应用于山洪预报预警的实例。

随着数值天气预报技术的发展, 降水预报的精度不断提高, 为增长山洪灾害预报的精度和预见期提供了可

能[6]。当前数值天气模式可以很好地模拟出大尺度天气系统最重要的平均特征，但空间分辨率有限，空间分辨率为十几公里甚至几十公里，且缺少区域信息，很难精确地预测山洪易发小区域的各种要素[7]，不满足山洪灾害预报精度要求。

将雷达估测降水和数值天气模式结合，已有较多的研究成果[8]，美国、香港等地已得到应用[9]。两种方法的降水预报均受局地影响较大，因此其应用区域多位于城市附近或大尺度的较平坦地区，在山洪灾害易发地区应用较少[10]。

2. 基于多元信息的致灾山洪降雨预报方案设计

卫星遥感、天气雷达、高空和地面大气探测、地面自动雨量站等信息均能用于降水预报，且基于各类信息的降水预报模型也较多。目前，使用较广泛的两类模型，主要还是采用天气雷达测量信息的雷达估测降水模型以及采用高空和地面大气探测信息的数值天气预报模型。

自 20 世纪 70 年代以来，国内外对雷达估测降水方法开展了大量的研究，并在许多地区建设了天气雷达，能实现未来 0~2 h 降雨预估，但 0~2 h 的预警则显得时间太短。目前，数值模式已能实现天气预报的定时、定点和定量，不同模式、不同尺度的数值预报系统预见期可达 72 h 以上。如能将数值预报技术推广至山洪易发地区进行降水预报，则能使山洪灾害的有效预警时效大大延长。

研究表明[11] [12]，雷达估测降水的误差比率随着空间尺度增大先减后增，而数值模式随尺度增大误差比率总体递减。在中小尺度雷达估测降水总体较准确，较大尺度则雷达不如数值模式。对于临近预报而言(3 h 左右)，利用雷达外推技术具有高精度的时空分辨率，且准确率显著提高，随着时效增长，雷达预报误差快速放大。与此同时，数值模式虽有预测中小尺度天气系统的潜势，但其定量预报的时空分辨率和可用时效达不到临近预报要求。因此，将雷达外推技术和快速更新循环的数值天气预报模式融合是山洪灾害预报的发展方向。

如果将雷达和卫星云图(0~2 h)、高空和地面大气探测(0~24 h)、数值预报产品(0~72 h)等信息，应用于山洪易发地区的山洪灾害预报，将能解决山洪预报时效性短的问题。为此，本文提出了基于雷达、高空、地面大气探测以及模式产品等多源信息融合的无缝滚动降雨预报方法，将预警时效由不足 2 h 提升到 72 h。多源信息融合的无缝滚动降雨预报原理见图 1。

数值模式和雷达外推方法的预报能力，随着预报时效的增加存在一个交叉点，交叉点以外，数值模式的预报能力要强于雷达外推方法。如何推求交叉点，许多科学家作了大量的对比分析，结论大都位于 1~3 h 之间。针对山洪预警需求，为简化计算工作量，本文交叉点统一取为 2 h。同时为与高空、地面探测信息相配合，每日 08 h、20 h 开展数值模式预报，当各种时段的预报雨量值接近发生山洪临界雨量值时，开展并加密雷达外推预报频次。

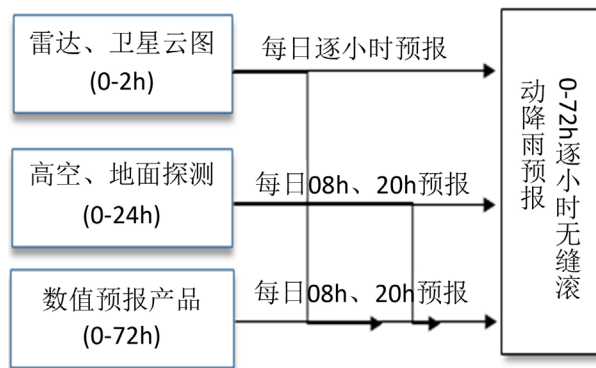


Figure 1. Theoretic diagram of seamless rolling forecasting by coupling multiple sources of information

图 1. 多源信息融合的无缝滚动降雨预报原理图

山洪灾害预报的具体流程以及加密雷达外推预报频次的触发条件为:

- 1) 每日 08 h、20 h 开展数值天气预报, 预测较大区域的 72 h 甚至更长预见期降雨过程;
- 2) 每日 08 h、20 h 利用最近高空、地面探测信息经过数据同化后, 开展 0~48 h 较大区域逐小时精细化预报;
- 3) 将 0~48 h 预报成果划分为若干区域, 与已有的各区域发生山洪灾害的时段(如 1 h、6 h、12 h、24 h、48 h)临界雨量进行对比, 若预报接近或超过临界雨量时, 作为触发加密雷达外推预报频次的条件;
- 4) 针对可能发生山洪灾害的区域, 利用雷达信息开展 0~2 h 临近降雨预估, 特别是反演较为准确的未来 30 min 降雨, 为山洪灾害预警提供决策依据。

3. 基于山洪灾害预报的降水预报模式改进

数值天气预报模式在面积较小的山区应用, 需要解决受局部地形影响的降水不均匀性, 以及数值模式初值和模式自身存在的误差问题。数值模式初值和模式自身存在的误差主要通过选择合适的模式和预报区域实时的资料同化解决, 受局部地形影响的降水不均匀性则需要利用地面雨量观测信息进行拟合率定。

3.1. 山洪灾害预警预报的模式系统选择

由于造成山洪灾害的暴雨过程发生的时空尺度小, 故采用数值天气预报模式也只能是中小尺度的。目前, 可用于山洪灾害预警预报的模式主要有: 中国气象局武汉暴雨研究所与中国科学院大气物理研究所的 AREM 模式系统、中国气象科学研究院的 GRAPES-MESO 模式系统以及美国的 WRF 模式系统。三个主要模式系统的性能指标如表 1。

从模式系统的动力框架、可支持的最高分辨率、物理过程、同化系统等指标的对比可见: 因静力平衡假设在中小时空尺度下不适用, 需要非静力平衡的动力框架, 同时还需要更完善的模式物理过程, 以及更强的资料同化能力; 此外, 中小尺度模式需要高分辨率数值模拟和并行计算效率。

通过对以上三种模式 2012 年 5 月 1 日至 2012 年 11 月 25 日华中区域(24.5~36.53°N, 104~117.23°E)降水(小雨、中雨、大雨、暴雨、大暴雨)、2 m 温度均方根误差、500 hPa 高度场均方根误差、850 hPa 风场均方根误差、850 hPa 温度场均方根误差等 9 个要素对比评估, 认为 WRF 模式的实际预报能力最优, 因此, 开展山洪灾害的数值预报试验选用 WRF 模式。

3.2. 数值预报模式资料同化

中小尺度数值模式的初值/边界条件一般为前 6 h 或者 12 h 全球模式的预报场, 预报场的背景场往往与预报区域的观测值有一定的差异, 两者之间资料同化能提高数值预报模式的精度。从资料同化的角度来说, 同化可信的资料越多越能改善背景场的精度, 有利于提高预报水平; 而同化次数增多又会导致模式起报时间提前, 模式积分时间增多, 预报水平降低。如何找到这二者的合理配置, 需要进行大量的试验。背景场资料一般与探空资料和地面观测资料进行同化, 同化方案则考察非循环同化、不同循环同化等多种方案。表 2 为华中某区域同化试验设计方案。

试验 Gfs0820DA0-Gfs0820DA3 为考察模式不同的循环同化方案对降水的影响。Gfs0908DA0 和 Gfs0908DA1 考察非循环同化的影响。结果表明, 不管循环同化与否, 同化观测资料能够改善 24 h 累积降水量的模拟, 而循环同化中, 以 12 h 的循环同化间隔模拟效果最好。资料同化后, 即可开展累积雨量和逐时雨量分析计算。

3.3. 数值预报模式产品的降水偏差订正

由于数值模式初值和模式自身存在的误差, 导致数值预报产品存在着一定的误差, 因此, 需采用适当的方法对数值模式直接输出的产品进行处理, 从而改进预报效果。一般而言, 降水偏差会随模式预报时效、降水不

Table 1. Main specifications of three numeric forecasting modes**表 1.** 三个主要模式系统的性能技术指标

模式	动力框架	分辨率	物理过程	同化系统	嵌套	成熟度
AREM	静力框架	公里级	较完善	客观分析/LAPS	支持	发展中
GRAPES	非静力框架	公里级	较完善	3Dvar	支持	发展中
WRF	非静力框架	米级	完善	3/4Dvar	支持	较成熟

Table 2. Data assimilation design scheme**表 2.** 同化试验设计方案

试验名称	起报时间	GFS资料	同化资料	同化时刻	降水时段	模拟时段
Gfs0820DA0	2011060820	00~36 h	/	/	0908~1008	12~36 h
Gfs0820DA1	2011060820	00~36 h	探空+地面	0820	0908~1008	12~36 h
Gfs0820DA2	2011060820	00~36 h	探空+地面	0902,0908	0908~1008	12~36 h
Gfs0820DA2p	2011060820	00~36 h	探空+地面	0820,0908	0908~1008	12~36 h
Gfs0820DA3	2011060820	00~36 h	探空+地面	0820, 0902,0908	0908~1008	12~36 h
Gfs0908DA0	2011060908	12~36 h	/	/	0908~1008	00~24 h
Gfs0908DA1	2011060908	12~36 h	探空+地面	0908	0908~1008	00~24 h

同临界值(阈值)和具体天气过程的不同而不同,而降水预报的准确性直接影响山洪灾害预报的准确性。

降水偏差订正可通过统计数值模式预报值和预报区域地面观测值在不同阈值条件下降水出现频率的两组数据(如图 2),采用多项式插值的方法对它们进行曲线拟合、获得不同阈值模式降水预报的转换系数,即将模式降水预报的频率分布曲线调整到与观测降水频率分布曲线一致,这种保持出现频率一致的方法称为“频率匹配法”,如从空间上的分布来理解(图 2(b), 图 2(c)),频率的大小实际上就是空间范围的大小,因为此法考虑了预报和实况雨区面积的一致性,所以“频率匹配法”也可称为“面积匹配法”,这样利用所获得的转换系数从而达到订正预报降水偏差的目的。

4. 基于雷达预估的降水短期预报

20 世纪 70 年代以来,雷达估测降水技术得到长足的发展,雷达估测降水主要考虑降水类型和地理位置等的影响。由于山体对雷达电磁波的阻挡,雷达估测降水很少考虑海拔高度因素,山区随着海拔高度的变化,降水会呈现不同的变化趋势,而山区正是山洪灾害发生的高频区。为实现山洪易发区雷达估测降水,则须建立海拔高度和降水量的模型,并采用地面降水资料对雷达估测降水订正。

复杂地形雷达定量测量降水的误差来源有: 1) 固定静止或近似静止的地物杂波具有较高的反射率值,导致降水量的高估,需剔除; 2) 雷达不能完全将降水回波和非降水回波区分,如何评价数据质量的好坏仍然是个难题; 3) 距离雷达较远的降水系统,当雷达波束从降水系统顶上扫过时,无法完整的探测到降水粒子,造成降水的过低估测; 4) 不同降水类型、地区和时间的 Z-I 关系都存在着很大的差异,使用不合适的 Z-I 关系时导致降水估测误差。

因此,本文提出以 Z-I 最优算法为基础,利用大数据提取数据属性间隐含信息,减少雷达估测中的主观因素,通过相异度函数检测海量雷达数据,杂波过滤清洗伪数据,DBSCAN 算法聚类分析,偏差值动态修订雷达估测降雨等方法,构成基于大数据的自分型雷达估测降水最优化算法。

4.1. 雷达数据清洗

采用相异度函数对海量雷达数据进行清洗,并将相异度 > 10 作为杂波过滤。

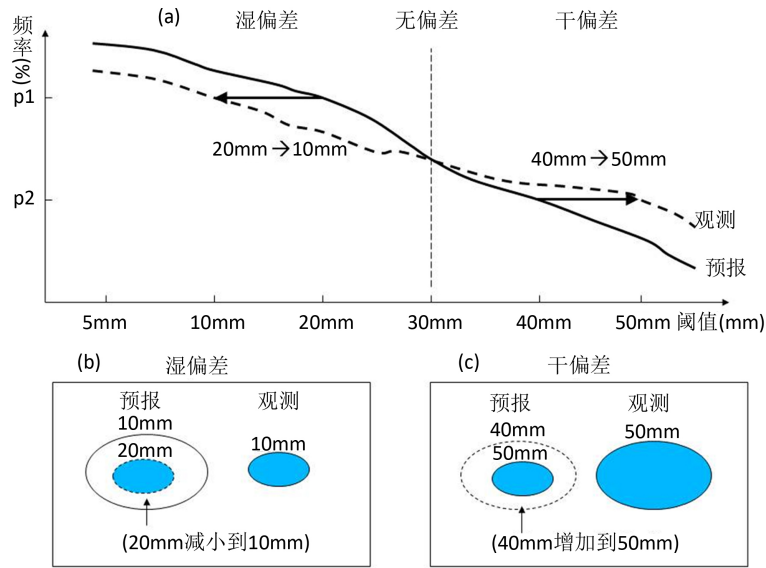


Figure 2. Theoretic diagram of the precipitation probability and area matching
图 2. 降水的频率和面积匹配方法原理图

$$f(x_i) = \frac{1}{n} \sum (X_i - \bar{X})^2 \quad (1)$$

式中： X_i 为各簇内部的格点降水值； \bar{X} 为各簇的特征值。

4.2. 雷达数据聚类分析

采用最小化函数求聚类分析各簇的偏差值：

$$g(x_i) = \min \{ (X_i - R_i)^2 \} \quad (2)$$

式中： X_i 为同一时次的雷达估测降水值， R_i 为同一时次同一区域自动站降水插值。

4.3. 雷达估测降雨动态修订

对雷达定量降水估计订正的基本思路是认为质量控制后的自动雨量站降水量是客观的，能代表一个区域的平均降水，而雷达定量降水估计能够反映降水场的结构，但存在量值上的系统偏差，仅仅使用未经订正的雷达回波资料会带来较大的误差。

雷达预估雨量分析流程图，如图 3 所示。

最优法估测降水。所有自动雨量站观测的 1 小时降雨量记录总数为 N ，观测值用 G_n 表示， $n = 1, 2, 3, \dots, n$ ，对第 n 个雨量值 G_n 来说，有 M 个与之时空相对应的雷达回波强度 Z_{dBnm} ， $m = 1, 2, 3, \dots, M$ ，根据雷达反射率因子和降水强度之间的关系式 $Z = A I^b$ ，可将 Z_{dBnm} 转化为降水强度 I_{nm} ，即

$$I_{nm} = 10^{\frac{Z_{dBnm} - 10 \lg A}{10b}} \quad (3)$$

对降水强度进行时间积分就可以得到雷达测量的 1 小时降水，记为 R_n ， $n = 1, 2, 3, \dots, N$ 。

$$R_n = \sum_m^M (W_{nm} \times I_{nm}) \quad (4)$$

式中： W_{nm} 是资料所代表的时间权重系数，根据雷达观测时间确定。

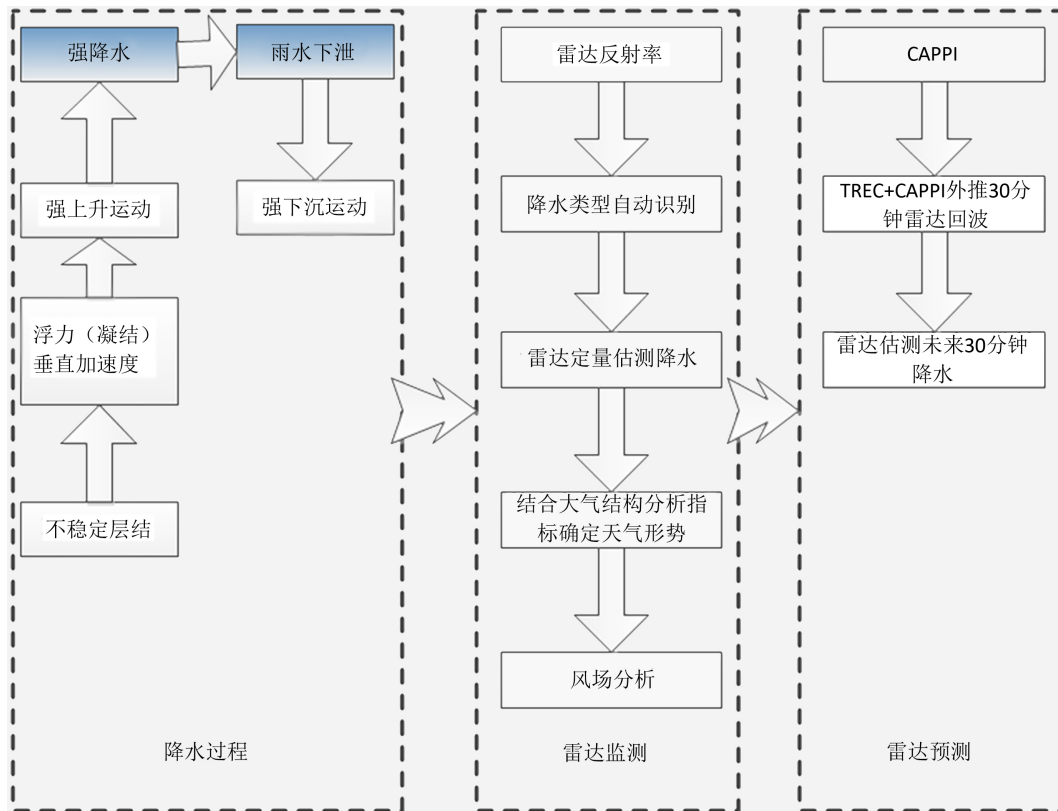


Figure 3. Flowchart of rainfall estimation in radar system

图 3. 雷达预估雨量分析流程图

利用自动雨量站资料，最优化估测降水方法中采用最佳判别函数 C_{TF} [13]:

$$C_{TF} = \min \left\{ \sum_{i=1}^n \left[(I_i - R_i)^2 + |I_i - R_i| \right] \right\} \quad (5)$$

式中: I_i 为雷达估计的各个样本的雨强值, R_i 为自动雨量站测量的雨强值。不断的调整 $Z-I$ 关系中的参数 A 和 b 的值, 当 C_{TF} 值为最小时, 会使得雷达估测值最逼近实测值。

5. 研究区域实例

中国湖南省临湘市, 位于北纬 $29^{\circ}10' \sim 29^{\circ}52'$, 东经 $113^{\circ}15' \sim 113^{\circ}45'$ 之间, 地处东亚亚热带季风湿润气候区, 属中亚热带向北亚热带过渡的边缘, 年均降水量 1469.1 mm , $4 \sim 8$ 月为雨季, 降水量占全年的 70% 以上。临湘市地势南高北低, 滑坡泥石流发育, 由暴雨引发的山洪危害严重, 引起人员伤亡, 冲毁厂矿、房屋、道路、水库、良田, 致使通讯、电力中断。1983 年至 2011 年 $4 \sim 9$ 月期间, 直接经济损失 1000 万元以上且受灾人口超过 10 万人的暴雨山洪灾害有 20 次左右。

5.1. 数值预报模式降水短期预报

1) 数值预报模式选择

临湘市各类模式晴雨预报效率评分见图 4, 其中 24 h AREM 晴雨预报效率评分比 GRAPES 模式低, WRF/3d、WRF/L 比 GRAPES 模式高。 48 h AREM、WRF/3d 晴雨预报效率评分比 GRAPES 模式低, WRF/L 比 GRAPES 模式高。因此, 该地区山洪灾害的数值预报试验选用 WRF 模式。

2) 资料同化及最优化参数组合方案

在暴雨的数值预报中，模式微物理过程、积云参数化方案对模拟结果的影响最为显著，为了获得山洪数值预报中最佳的物理参数组合，选取了在东亚地区应用效果较好的两组微物理过程，两组积云参数化方案，并通过4组模拟试验(其它物理参数设置一致)，得出面向山洪灾害防治区的数值预报最优化参数组合方案。

采用WRFV3.4 (The Weather Research and Forecasting)模式三层双向嵌套方案(见表3)，模式中心为研究区域，地图投影采用兰勃特投影，三层模式水平分辨率分别为27 km、9 km和3 km，水平格点数分别为：322*202、322*253和472*322，垂直层数为51层。使用的地形数据分别是2 m、30 s。

3) 降水偏差订正

图5为2014年5月21日08时至22日08时24小时累积观测降水和累积预报降水。从图中可以看出方案对整个雨带及其暴雨中心的落区都模拟的较好，分别将研究区域南部的暴雨中心模拟出来，特别是对临湘附近的降雨强度和落区模拟较好，但是预报强度较实况观测偏大。

从订正前后24小时、48小时预报累积降水量看，模式降水量一般存在系统性的偏差，订正后24小时预报的偏差波动范围在正负2毫米左右，48小时预报的偏差波动范围要稍大一些，降水预报的系统误差基本得到矫正。至于降水落区位置预报的准确性，通过TS和ETS评分看，0~24 h和24~48 h订正后小雨和大暴雨量级的评分都有改善，其中小雨量级的预报改善较明显。改进主要表现在小雨量段和大雨量段的原因是两端降水的偏差都较大，其中小雨量降水段有大片虚报的面积，而大雨量降水段虽然面积本身范围也许并不大，但雨量偏差较大，所以对两端订正的效果要明显一些。

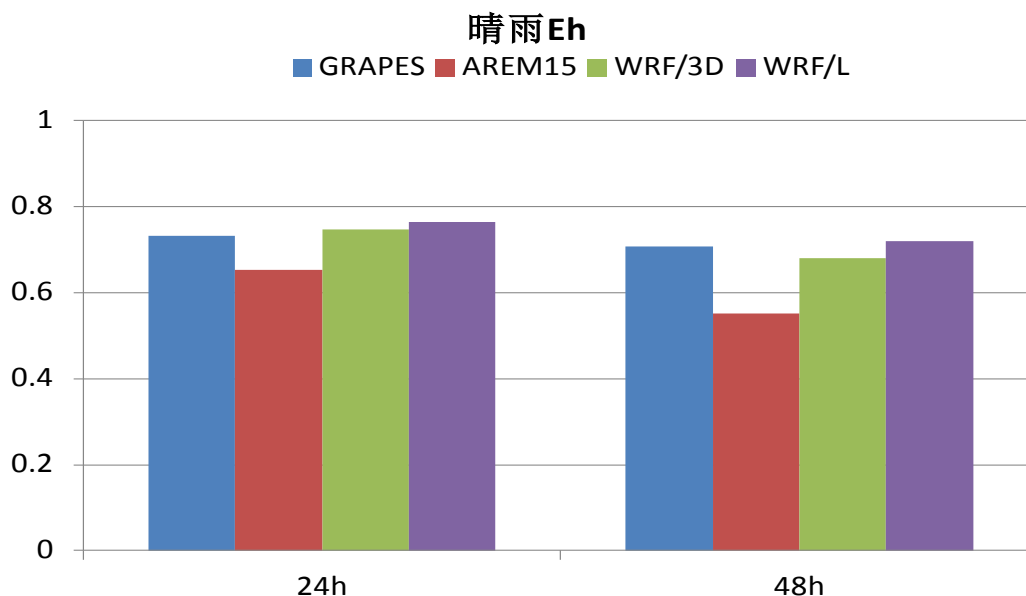


Figure 4. Sunny or rainy efficiency for 24 h and 48 h weather forecast by the three models of GRAPES, AREM15, WRF/3d and WRF/L

图4. GRAPES、AREM15、WRF/3d与WRF/L模式24h及48h晴雨效率评分

Table 3. The optimized combination of parameters for numerical rainfall simulation in flash-flood affected region

表3. 山洪灾害防治区降雨数值模拟最优化参数组合方案

微物理参数	对流参数	边界层参数	辐射方案	路面模式
WSM 6-class graupel	Grell-Devenyi ensemble	YSU	RRTM 长波、Goddard 短波, 15 分钟计算一次	Noah LSM

三层嵌套；内层向外层网格反馈方案；三维变分12h循环同化间隔模拟；基于频率(或面积)匹配的降水偏差订正。

经过降水偏差订正后,即可判别是否达到该地区发生山洪的临界雨量,决定是否起用雷达预估短期降水。

5.2. 雷达预估的降水短时预报

临湘市属于岳阳市,岳阳市天气雷达台站位置见图6,以雷达站作为中心,半径150 km范围内的区域作为研究区域。

1) 雷达回波处理

采用S波段的多普勒天气雷达最大探测距离是230 km,降水产品分辨率是1 km,通过PPI扫描,可以得到不同高度上的降水强度。因为雷达探测到的原始数据存在着很多噪声,雷达回波很容易受到山脉的干扰,形成地物杂波,严重影响雷达的实测值。在复杂地形的雨量估测之前,应对雷达资料进行数据处理,主要包括孤立

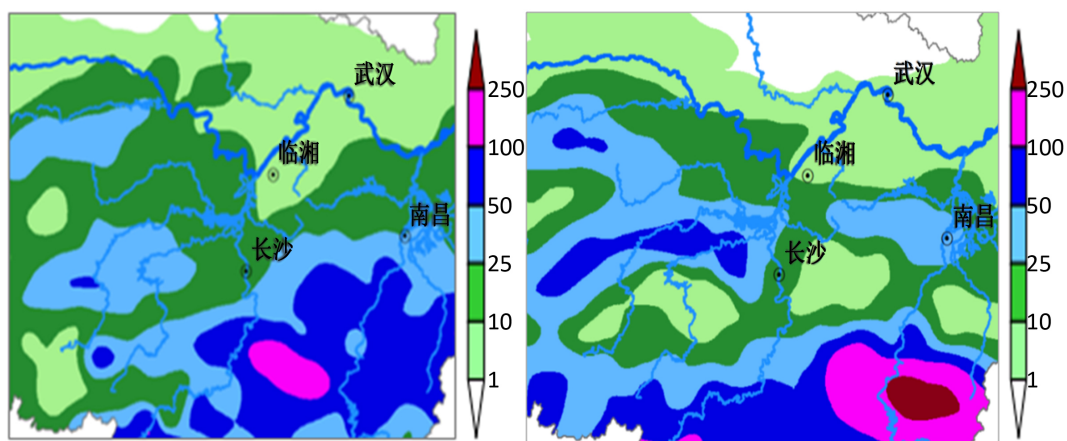


Figure 5. The comparison diagrams between 24 hrs observed rainfall and forecasted rainfall from 8a.m May 21 to 8a.m May 22 (unit: mm)

图5. 2014年5月21日08时至22日08时24小时累积观测和预报降水量对比图(单位: mm)



Figure 6. Terrain map in the vicinity of Yueyang radar

图6. 岳阳雷达周边地形分布图

点剔除、畸异回波检测、阻挡订正、构成复合平面，其方法是通过平均值替换和分箱去噪技术进行数据清洗与数据聚类分析。

2) 雷达外推的定量降水预报

读取的雷达数据，首先经过数据清洗与数据聚类分析后，即可按照最优法估测累计降水量。自动雨量站数据的处理采用平均校准法，在整个测量区域内用一个标准订正因子去乘各点雨量的测量值，得到订正后的降水分布。读取估测偏差库的相应值作为偏差阈值，当偏差值超出偏差阈值时，通过调整 Z-I 反演关系直至偏差值小于偏差阈值。调整 3 次后若偏差值仍大于偏差阈值，则做为可疑值抛弃。

图 7 为雷达 2014 年 5 月 21 日 10 点 45 分 TREC 矢量图，外推 30 分钟后(11 点 15 分)的雷达反射率因子图与相应时刻的回波实况图。对比分析图可知，30 分钟外推回波的大体位置与实况较为吻合，雷达站西侧和北侧的强回波中心位置和范围也与实况对应较好，说明 TREC 能够较为真实的反映回波的移动情况，对于强对流天气提前预警具有重大的指示作用。

通过对 2014 年 3~9 月的中大型降水过程进行外推估测，得到 30 min 外推后的 1 h 累积降水量产品，并将 30 分钟外推的 1 h 累积降水量产品与 12 个具有代表性的雨量站降雨实况进行对比，见表 4 所示。

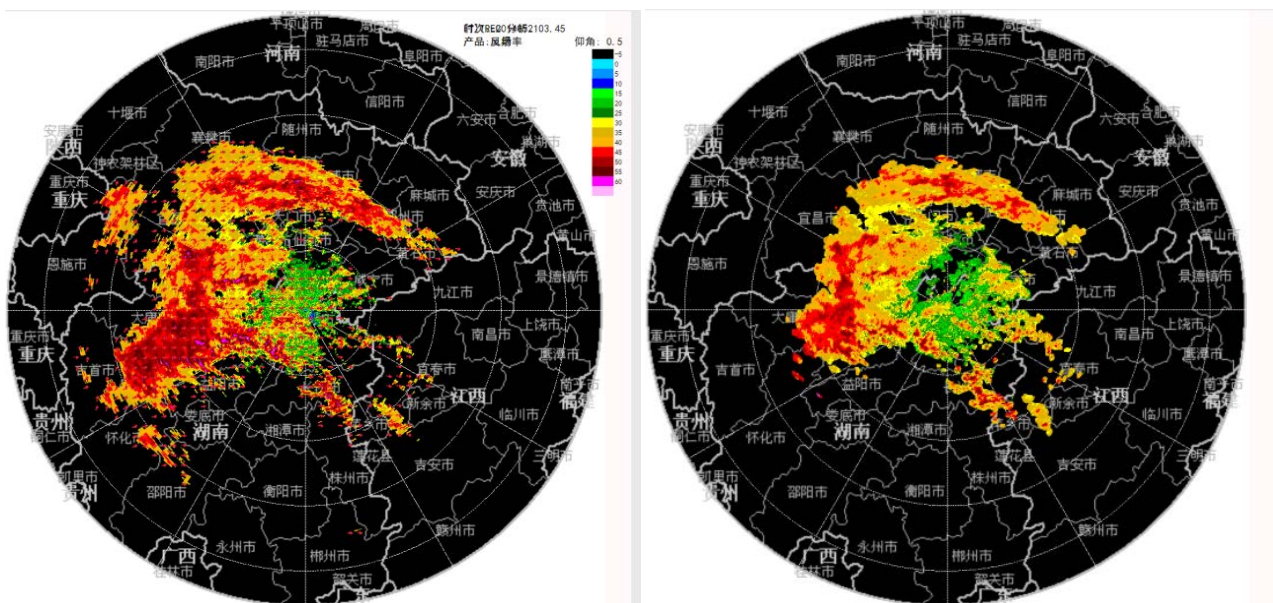


Figure 7. TREC vector map at 10:45, May 21, 2014 and echo live map at corresponding time after 30 min extrapolation
图 7. 2014 年 5 月 21 日 10 点 45 分 TREC 矢量外推的 30 分钟后与相应时刻的回波实况图

Table 4. Verification of precipitations at 12 gauge stations and extrapolated estimations at corresponding time
表 4. 12 个雨量站降水与对应时次的外推估测产品检验

站号	平均相对误差	站号	平均相对误差
P3698	29.8%	P2680	27.9%
P3697	33.8%	P3666	32.0%
P3696	40.4%	P3654	41.3%
P3692	35.6%	P3647	32.0%
P3690	31.6%	P3627	29.8%
P3689	35.7%	P3583	34.1%

结果与实况比较表明：外推预测结果与实况相比较，在强度中心方面与实况吻合程度高，能很好的体现出降雨强度。在回波的范围、位置方面有较好的吻合，对于面积范围较大且移动稳定和变化不明显的回波在范围与位置方面，外推预测效果好于范围较小和变化较明显的回波，对流成熟阶段的外推预测正确率高于发展和消亡阶段。

6. 结论

1) 针对依据实测降雨开展山洪预报预警时效性短的问题，提出了基于雷达、高空、地面大气探测以及模式产品等多源信息融合的无缝滚动降雨预报方法，充分地利用雷达和卫星云图(0~2 h)、高空和地面大气探测(0~24 h)、数值预报产品(0~72 h)实现逐小时不间断无缝滚动预报，预警时效由 2 h 提升到 72 h。

2) 研究认为 WRF 数值预报模式较为适用山洪灾害预报。其中，WSM6 云微物理过程、Grell-Devenyi ensemble 对流参数化方案和 YSU 边界层参数配置方案，对致洪山洪暴雨过程模拟较好。

3) 基于雷达数据速率高、周期短、数据量非常大等大数据特性，提出的通过相异度函数检测海量雷达数据，杂波过滤清洗伪数据，DBSCAN 算法聚类分析，偏差值动态修订雷达估测降雨等大数据分析方法，能显著提高雷达短时预测降水的准确性。

4) 数值降水预报和雷达预测降水均需偏差修正。其中，基于频率(或面积)匹配的降水偏差订正方法，能显著改善模式降水预报中雨量和雨区范围的系统性偏差，订正后降水预报的范围和平均强度与实况更加接近，且偏差越大订正效果越好。

基金项目

国家重点研发计划(批准号：2016YFC0402708)、水利行业专项经费项目(项目编号：201201063)。

参考文献 (References)

- [1] 李红霞, 覃光华, 等. 山洪预报预警技术研究进展[J]. 水文, 2014, 34(5): 12-16.
LI Hongxia, QIN Guanghua, et al. Advances in study on flash flood forecast and warning. Journal of China Hydrology, 2014, 34(5): 12-16. (in Chinese)
- [2] 杨扬, 张建云, 等. 雷达测雨及其在水文中应用的回顾与展望[J]. 水科学进展, 2000, 11(1): 92-98.
YANG Yang, ZHANG Jianyun, et al. Review and prospect on the application of weather radar in hydrology. Advances in Water Science, 2000, 11(1): 92-98. (in Chinese)
- [3] LIN, C. A., VASIC, S. and TURNER, B. Precipitation forecast based on numerical weather prediction models and radar nowcasts. Sixth International Symposium on Hydrological Applications of Weather Radar, Melbourne, ERAD, 2004.
- [4] 张利平, 赵志朋, 等. 雷达测雨及其在水文水资源中的应用研究进展[J]. 暴雨灾害, 2008, 27(4): 373-377.
ZHANG Liping, ZHAO Zhipeng, et al. An overview of precipitation measured by radar and its application on hydrology and water resources. Torrential Rain and Disasters, 2008, 27(4): 373-377. (in Chinese)
- [5] 魏林宏, 郝振纯, 等. 雷达测雨在水文学中的应用——影响预报精度的因素分析[J]. 水利水电技术, 2004, 35(5): 1-4.
WEI Linhong, HAO Zhenchun, et al. Application of radar rainfall measurement to hydrology. Water Resources and Hydro-power Engineering, 2004, 35(5): 1-4. (in Chinese)
- [6] 彭新东, 李兴良. 多尺度大气数值预报的技术进展[J]. 应用气象学报, 2010, 21(2): 129-138.
PENG Xindong, LI Xingliang. Advances in the numerical method and technology of multi-scale numerical prediction. Journal of Applied Meteorological Science, 2010, 21(2): 129-138. (in Chinese)
- [7] 胡淳焱, 黄娟, 等. 基于强度尺度法的雷达和数值模式定量降水预报检验对比[J]. 热带气象学报, 2015, 31(2): 273-279.
HU Chunhan, HUAN Juan, et al. Verification of quantitative precipitation forecast between radar and numerical model based on intensity-scale method. Journal of Tropical Meteorology, 2015, 31(2): 273-279. (in Chinese)
- [8] 陆桂华, 吴娟, 等. 水文集合预报试验及其研究进展[J]. 水科学进展, 2012, 23(5): 728-734.
LU Guihua, WU Juan, et al. Advances in hydrologic ensemble prediction experiment. Advances in Water Science, 2012, 23(5): 728-734. (in Chinese)
- [9] ATENCIA, A., RIGO, T., SAIROUNI, A., et al. Improving QPF by blending techniques at the meteorological service of Gata-

- lonia. Nat Hazards Earth Syst Sci, 2010(7).
- [10] 胡胜, 罗聪, 等. 基于雷达外推和中尺度数值模式的定量降水预报的对比分析[J]. 气象, 2012, 38(3): 274-280.
HU Sheng, LUO Cong, et al. Comparisons of one hour precipitation forecast between the radar extrapolation and the mesoscale numerical model. Meteorological Monthly, 2012, 38(3): 274-280. (in Chinese)
- [11] AUSTIN, G. L., BELLON, A., et al. On the interaction between radar and satellite image nowcasting systems and meso-scale numerical models. Symposium on Mesoscale Analysis and Forecasting, Vancouver, ESA SP, 1987: 282.
- [12] GOLDING, B. W. A system for generating automated very short range forecasts. Meteorol A Zppl, 1989(5).
- [13] 张培昌, 杜秉玉, 戴铁丕. 雷达气象学[M]. 北京: 气象出版社, 2001: 181-184.
ZHANG Peichang, DU Bingyu and DAI Tiepi. Radar meteorology. Beijing: China Meteorological Press, 2001: 181-184. (in Chinese)