

狄靖月, 赵琳娜, 张国平, 等. 2013. 降水集合预报集成方法研究. 气象, 39(6): 691-698.

降水集合预报集成方法研究^{*}

狄靖月^{1,2} 赵琳娜^{1,3} 张国平^{1,2} 许凤雯^{1,2} 王 志^{1,2}

1 中国气象局公共气象服务中心, 北京 100081

2 国家气象中心, 北京 100081

3 中国气象科学研究院, 北京 100081

提 要: 基于 TIGGE(the THORPEX Interactive Grand Global Ensemble)资料, 对中国气象局(CMA)、欧洲中期天气预报中心(ECMWF)、美国国家环境预报中心(NCEP)和日本气象厅(JMA)的集合数值预报结果进行降水集成。采用算术平均法、TS 评分集成法和 BS 评分集成法在我国东南地区进行降水集成, 对比分析结果表明: 基于 TS 评分的多模式降水集成无论在分区降水评分中, 还是在东南地区的台风型降水和非台风型降水实例中, 都有效地改进了大雨以上的降水预报效果; 基于 BS 评分的集成方法和算术平均集成法预报效果次之。东南地区 5 个子区域的降水集成试验结果表明: 各子区域基于 TS 评分集成后降水的平均绝对误差普遍小于基于 BS 评分后的降水平均绝对误差。广东东南和浙江北部区域基于 TS 集成后的降水 TS 评分值最优, 浙闽沿海和广东西北部区域基于 TS 集成后的降水 TS 评分次之, 处于中上水平。基于算术平均集成和 BS 集成的降水的 TS 评分值只有在广东东南区域表现出较好的效果。

关键词: 集成方法, 定量降水预报, TIGGE

中图分类号: P456

文献标识码: A

doi: 10.7519/j.issn.1000-0526.2013.06.004

Study on Precipitation Multimodel Super Ensemble Forecast Technique

DI Jingyue^{1,2} ZHAO Linna^{1,3} ZHANG Guoping^{1,2} XU Fengwen^{1,2} WANG Zhi^{1,2}

1 Public Meteorological Service Centre, CMA, Beijing 100081

2 National Meteorological Centre, Beijing 100081

3 Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081

Abstract: Ensemble-weight methods based on the Threat Score (TS), the Brier Score (BS) and the Arithmetic Average (AA) were employed to combine the precipitation prediction of four ensemble numerical prediction systems (CMA, ECMWF, NCEP and JMA) from the TIGGE over the southeast of China and its five sub-regions. The results of comparison analysis of the four ensemble numerical prediction systems indicated that the super ensemble based on TS-weight always provides more skillful performance in any of the four ensemble numerical prediction systems regionally and shows the best prediction performance of rainfall impacted by typhoon landing or not. The grand ensemble based on BS-weight and AA-weight also shows the better skillful performance. Moreover, verification of super ensemble method in five sub-regions showed that the super ensemble precipitation based on TS-weight always has a less mean absolute error (MAE) and higher TS score in most sub-regions than that based on BS-weight and AA-weight. The super ensemble precipitation based on TS-weight provides the best performance in the southeast of Guangdong and northern Zhejiang and the secondary performance along the coast of Zhejiang and Fujian and the north-

* 公益性行业(气象)科研专项(GYHY201006037 和 GYHY200906007)和国家自然科学基金项目(40971016)共同资助

2012 年 8 月 13 日收稿; 2012 年 10 月 19 日收修定稿

第一作者: 狄靖月, 主要从事应用气象研究. Email: dijy@cma.gov.cn

通信作者: 赵琳娜, 主要从事数值预报应用及应用气象研究. Email: zhaoln@cma.gov.cn

west of Guangdong. The skillful performance based on BS-weight and AA-weight is provided only in the southeast of Guangdong.

Key words: multimodel super ensemble technique, quantitative precipitation forecast, TIGGE

引 言

强降水是诱发山地泥石流灾害的关键驱动因素,在泥石流灾害预警预报中引入降水量预报因子,可以在小时、天、周、月甚至年的尺度上提前制作泥石流灾害危险度预报和预警,有利于降低降水引发的泥石流灾害的损失。目前泥石流预报业务使用的降水因子有两种:一种是预报员制作的降水落区,主要是 0、10、25、50、100 和 250 mm 降水等值线预报;另一种是数值模式的格点场降水预报。对于泥石流预报,这两种降水预报各有利弊,前者准确率高,但由于是降水分级预报结果,因此难以量化应用。后者的缺陷是针对大雨以上的预报准确率比较低,给泥石流预报带来很大的不确定性。因此,如何得到具有较高准确率的格点场预报降水是一个具有挑战性的工作。Krishnamurti 等(1999)考虑了初始场和模式的不确定性,提出了多模式超级集合预报思想,即使用多个模式的结果,每个模式都有其自身的子集合预报系统,并依据一定的方法对预报结果进行集成,以获得最佳决定性预报。国内学者的研究也表明各成员预报的等权平均或不等权平均的集合预报明显优于单一的控制预报,可以抑制随机误差,预报结果明显改善(赵琳娜等,2010;蔡其发等,1999;杨松等,2003;陈丽娟等,2005;赵声蓉,2006)。TIGGE(the THORPEX Interactive Grand Global Ensemble)是用于观测系统研究及预报试验的全球合作数据集,资料包括了多个国家的集合预报模式的数值预报产品。TIGGE 资料,目前已在概率降水预报、水文预报及集成降水预报等方面得到了初步的应用(Zhao et al,2011;2012;赵琳娜等,2012;Li-ang et al,2012;Bao et al,2012;包红军等,2012),这些研究结果说明,集合预报降水的集成方法能够降低预报误差,提高预报技巧。

目前降水集成方法主要针对多种单一模式的集成,或是某一个模式多个预报成员的集成(周兵等,2006;1999;段明铿等,2004;曹晓钟等,2008;尤凤春等,2009;严明良等,2009;冯汉中等,2009;彭九慧

等,2008;马清等,2008;管成功等,2006)。而一般针对降水的集成研究大多关注降水总量的改善,而泥石流灾害预报则主要关注大雨以上量级的预报。本文研究的个例是一次引发泥石流的暴雨。受 2009 年第 15 号台风巨爵影响,广东西南部出现强降水,引发滑坡、崩塌地质灾害 37 起,其中,阳江发生地质灾害 35 起,占总数的 92.1%,而阳江正好处于降水大值中心,因此降水预报效果尤为重要。台风巨爵引发的降水过程在 9 月 14 日 20 时至 9 月 15 日 20 时 24 小时时间段内主要降水集中在广东西南部和中部偏南地区,其中阳江地区是大值中心之一,部分地区降水量达 100.0 mm 以上。

因此,本文的研究重点在于引发泥石流、滑坡的大雨以上的降水集成,针对 2009 年 9 月 14—15 日台风巨爵的强降水及 9 月 19 日的非台风型降水引发多起滑坡、崩塌、泥石流等地质灾害这一实际情况,选取这两次个例,分析 TS 评分集成法和 BS 评分集成法的效果,建立面向泥石流预报的集合预报降水集成方法。具体是采用中国气象局(CMA)、日本气象厅(JMA)、欧洲中期天气预报中心(ECMWF)和美国国家环境预报中心(NCEP)4 家的 TIGGE 资料,每个模式在成员内部进行集成,再针对 4 个预报结果进行二次集成的方式,研究重点集中在提高集成后大雨以上量级降水预报准确率,从而可为山地泥石流预报提供更准确的降水预报信息。

1 研究区和数据

研究区域是中国东南浙闽粤三省。该区域是泥石流的多发地带,灾害主要发生在夏季(5—10 月),其中在 6 和 8 月出现两个灾害峰值。华南前汛期降水、梅汛期降水和台风降水,容易在地质条件脆弱地区形成诱发泥石流灾害的前期有效雨量和当日雨量条件,是诱发该地区的泥石流灾害的主要原因(韦方强等,2010;张国平等,2010)。

研究资料是 TIGGE 中国中心收到的中国气象局(CMA)、欧洲中期天气预报中心(ECMWF)、美

国国家环境预报中心(NCEP)和日本气象厅(JMA)的 4 家集合预报模式的逐日的 20 时到次日 20 时(北京时,下同)的 24 小时降水量数值预报产品,各模式的水平分辨率、集合成员数和预报时效等参数见表 1。从表 1 可以看出,各成员的水平分辨率、预

报时效各不相同。

观测降水取自国家气象中心实时收到的东南三省的 320 个观测站资料(图 1),TIGGE 资料和降水观测资料均选取 2009 年 6 月 7 日 20 时至 2009 年 9 月 29 日 20 时进行研究。

表 1 参与 TIGGE 资料交换的 4 套集合预报(NCEP,CMA,JMA,ECMWF)相关信息

Table 1 The information of the four TIGGE centers (NCEP,CMA,JMA,ECMWF)

TIGGE 中心	国家/区域	模式	集合成员数/个	空间分辨率/°	预报时效/d
NCEP	美国	T126	21	1°×1°	16
CMA	中国	T213L31	15	0.5625°×0.5625°	10
JMA	日本	T319L60	51	1.25°×1.25°	9
ECMWF	欧洲	TL399	51	1°×1°	10

注: TIGGE 提供的 ECMWF 数据为高斯格点。

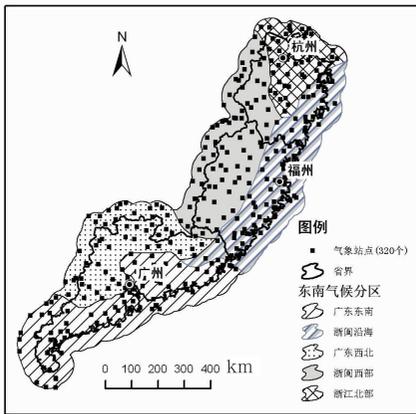


图 1 研究区域与站点分布情况

Fig. 1 The illustration of research areas and distribution of weather station

泥石流在三个省内均有分布,以浙江和福建两省最为集中,在地貌单元上,泥石流主要分布在浙闽丘陵和南岭(韦方强等,2010)。本文对东南地区 1970—2009 年的气象资料进行统计,根据与降水有关的 12 个因子:年均暴雨天数、年均暴雨雨量、平均暴雨雨量、年最大暴雨日数、年最小暴雨日数、最大暴雨日数年的暴雨雨量、最小暴雨日数年的暴雨雨量、最大暴雨雨量,5—10 月平均降水量(代表 6 个因子)、旱季降水量、雨季降水量和多年平均年降水量。利用信息量模型将整个东南地区划分成 5 个子区域:(1)广东东南、(2)浙闽沿海、(3)广东西北、(4)浙闽西部和(5)浙江北部(图 1)。分区后,能更好地将降水特征差异融入到泥石流预报分析中,为进一步的泥石流预报分析作基础。

2 TIGGE 降水分区集成方法

2.1 浙闽粤三省降水气候分区

基于降水因子在引发泥石流灾害的过程中的重要作用,考虑到东南地区泥石流灾害地区分布差异:

2.2 研究方法

本文采用双线性插值方法将集合降水预报格点场插值到 320 个观测站点上,根据 2.1 节 5 个气候分区内气象站点的降水预报和观测,进行降水集成,然后对集成结果进行检验分析,为进一步的泥石流预报模型研究作基础(图 2)。

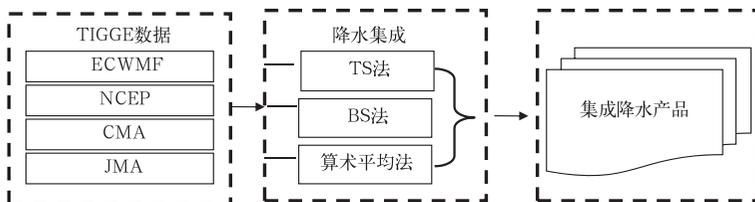


图 2 研究过程和思路示意图

Fig. 2 The illustration of the precipitation ensemble for debris flow forecast based on TIGGE data

2.3 降水集成方法

本文采用 TS 评分分析方法来判定各模式各成员对预报因子所占权重, TS 评分公式(曹晓钟等, 2008)如下:

$$TS = N_A / (N_A + N_B + N_C) \quad (1)$$

式中, N_A 表示降水预报正确的站(次)数, N_B 表示空报站(次)数, N_C 表示漏报站(次)数。TS 值越大表示预报结果越好。

本文中, N_A 表示所有样本中各站各成员的预报降水和观测降水都在 25.00 mm 以上的次数, N_B 表示所有样本中各站各成员的预报降水在 25.00 mm 以上, 观测降水未在 25.00 mm 以上的次数, N_C 表示所有样本中各站各成员的预报降水未在 25.00 mm 以上, 观测降水在 25.00 mm 以上的次数。

此外, 本文还采用 BS 评分计算各模式的权重, 定义公式如下(尤凤春等, 2009):

$$BS = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (f_i - o_i)^2 \quad (2)$$

式中, N 为二分类事件的预报数, f_i 表示某一天气事件发生的预报概率, o_i 表示实况, 事件发生 o_i 为 1, 事件不发生 o_i 为 0。BS 的取值范围是 0~1, BS 值越小越好。BS 等于 1 表示评分最差, 表示预报失效。

本文中, N 表示集合预报样本数, f_i 表示一个集合预报样本中降水在 25.00 mm 以上的成员所占所有预报成员的概率, o_i 表示实况降水在 25.00 mm 以上, 事件发生 o_i 为 1, 事件不发生 o_i 为 0。

由于本文考虑的是引发泥石流的降水预报, 因此, 更关注各模式及成员对 25.00 mm 以上的降水的预报效果, 即采用算术平均、TS 评分和 BS 评分 3 种集成方法后的集成预报效果。引入的 TS 和 BS 评分方法, 不仅仅用于检验预报的结果, 而首先是基于 TS 评分和 BS 评分对 25.00 mm 以上降水的评价, 构建多模式多成员的预报结果的权重, 将评分的结果作为求取模式权重的重要指标, 完成集合预报的集成。基于 TS 评分的集成思路为: 首先, 对 4 家集合预报模式各成员预报插值结果分别进行 TS 检验分析。以 CMA 集合预报为例, 针对 15 个不同的成员(1 个控制预报成员, 14 个扰动预报成员), 基于 2009 年 6 月 7 日 20 时至 9 月 29 日 20 时 24 小时降水预报这 115 个样本, 提取 6 月 7 日至 8 月 31 日的降水预报作为集成样本, 9 月 1—29 日的降水预报

作为检验样本, 分别求取 CMA 集合预报 320 个站、15 个预报成员的 TS 评分值, 其次, 根据各站、各成员的 TS 评分高低, 决定该成员在该模式集成降水预报结果中所占权重, 根据降水及所占权重, 最终得到 CMA 的确定性站点降水预报。对其他 3 种模式也采取类似方法, 得到 4 家集合数值模式的集成预报后, 同样对 4 家模式的集成降水以 TS 评分分析法进行集成, 得到 4 家模式 320 个观测站对应的超级集成预报。

基于 BS 评分方法的各模式集成构建方法大体思路类似, 计算方法有差异。基于 BS 评分方法首先基于集成样本, 计算各家集合预报模式预报效果的 BS 评分, 以获取该模式的权重, 根据 4 家模式的控制成员降水预报及模式所占权重, 最终得到 4 家模式 320 个测站对应的超级集成预报, 本文不再赘述。

3 结果及分析

3.1 单个模式集成前后的降水预报比较

图 3 表示从 2009 年 9 月 1—29 日 5 个区域上, 分别为 CMA、ECMWF、JMA 和 NCEP 4 个模式的控制预报的降水和基于 TS 评分法各成员集成后的区域集成降水预报(记为 ALL1)、基于 BS 评分法各模式集成后的区域集成降水预报(记为 ALL2)和观测降水情况。根据 2009 年 9 月的集成预报和单一模式控制预报比较分析可以看出(图 3a~3e): 5 个区域内, 单一模式的 24 小时降水预报与观测间均存在一定的偏差, 尤其是对大雨以上量级的降水预报, 各模式预报均存在较大的系统误差, 从降水趋势上看, 广东东南部和浙江北部, 模式降水的预报较为准确, 其他 3 个区域, 浙闽沿海、浙闽西部及广东西北部的预报系统偏差较为明显, 通过 TS 和 BS 权重法集成, 综合了各成员和各家模式对预报不确定性的把握, 使预报结论较为稳定, 降水特征更趋近于观测, 预报效果较好。

从对上述集成预报的平均绝对误差来看(表 2), 经过集成后的各模式降水预报, 平均绝对误差数均有明显减小, 各区域基于 TS 评分集成后的降水的平均绝对误差普遍小于基于 BS 评分后的降水平均绝对误差, 效果更好。以浙江北部为例, 预报趋势较为准确, 且各模式的平均绝对误差均较小, 在

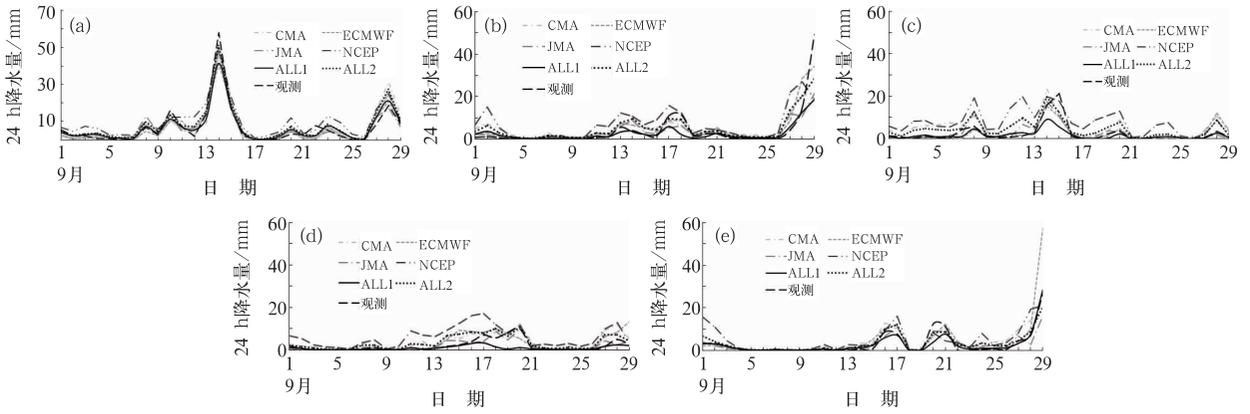


图 3 2009 年 9 月 1—29 日基于 TS 和 BS 方法集成预报、模式控制预报和观测在 5 个区域的降水平均(单位:mm)
 (a)广东东南, (b)浙闽沿海, (c)广东西北, (d)浙闽西部, (e)浙江北部

Fig. 3 The regional mean rainfall by observation, TS-grant ensemble, BS-grant ensemble and the control ensemble model of CMA, EC, JMA, NCEP during 1—29 September 2009
 (a) the southeast of Guangdong, (b) the coast of Zhejiang and Fujian, (c) the northwest of Guangdong, (d) the western parts of Zhejiang and Fujian, (e) the north of Zhejiang

表 2 2009 年 9 月 1—29 日各模式控制预报和 TS、BS 评分集成方法在 5 个区域降水预报的平均绝对误差 (单位: mm)

Table 2 Mean absolute error (MAE) of precipitation forecast of TS-grant ensemble, BS-grant ensemble and the control ensemble model of CMA, EC, JMA and NCEP in 5 areas during 1—29 September 2009 (unit: mm)

模式 区域	CMA	ECMWF	JAN	NCEP	ALL1	ALL2
广东东南	3.1716	2.2676	2.195	4.3198	2.2235	2.6016
浙闽沿海	3.3469	2.2193	2.4219	4.9974	2.2245	2.7369
广东西北	3.4416	1.3646	1.419	5.7517	1.5086	2.847
浙闽西部	2.0887	1.7327	0.9687	4.3116	1.2393	1.7606
浙江北部	1.8891	2.2342	1.4094	3.1478	0.9732	1.4193

这一前提下,为集成后的降水误差的进一步减小提供了良好的前期数据条件。由此可见,集成后的降水预报在平均绝对误差上得到了很好的效果。

3.2 不同集成方法集成效果对比分析

广东东南和浙江北部区域,基于 TS 评分的模式成员集成后的降水 TS 评分值明显大于其他任一单一模型,同时也优于算术平均集成降水及基于 BS 评分的模式集成后的降水,对于浙闽沿海和广东西北部,基于 TS 评分的模式成员集成后的降水 TS 评分值在整个比较的成员中处于中上水平(图 4)。这充分表明基于 TS 评分的模式成员集成的降水是具有一定参考意义的,尤其是对于预报趋势相对较好的模型输出,基于 TS 评分的模式成员集成的降水效果更好。

基于算术平均集成和 BS 评分的模式集成的降

水 TS 评分值只有在广东东南区域表现了较好的效果,集成的降水效果并不稳定,原因有待于进一步分析(图 4)。

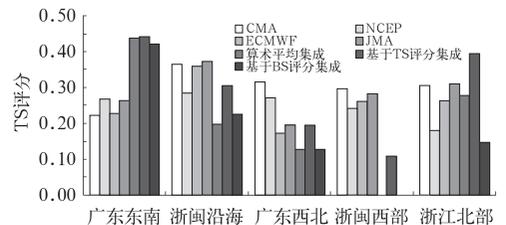


图 4 各集成方法和 CMA、NCEP、ECMWF、JMA 各家集合预报大雨以上量级预报的 TS 评分

Fig. 4 The TS score of precipitation forecast of more than 25 mm obtained from the CMA, ECMWF, JMA and NCEP and three grant ensemble methods

简单的算术平均降水集成及基于 BS 评分的模式降水集成在某些区域,对预报效果有较大的改进,而采用了模式成员的 TS 评分分值大小决定权重高低的方法,得到的集成降水评分普遍较高。因此,TS 评分的模式降水集成方法是对于大雨预报的一种较为有效的集成方法,值得进一步分析。

4 多模式降水集成个例分析

为了对集成方法进一步检验,本文以 2009 年 9 月期间的台风降水和非台风降水作为实例,对全体样本集成的个例进行抽样检验。

4.1 台风期降水个例分析

2009 年 9 月 14 日 20 时至 15 日 20 时 24 小时时间段内,台风巨爵引发的降水过程主要降水集中

在广东西南部和中部偏南地区,部分地区降水量达 100.00 mm 以上(图 5a)。针对阳江地区,4 个集合预报模式的控制预报对广东西南部的 24 小时降水预报存在一定差异,CMA 模式在降水带位置分布预报上偏差较大,预报量级偏小,预报效果不理想(图 5b₁);ECMWF 模式对降水大值中心的位置预报明显偏西,在降水量级上也普遍偏小(图 5b₂);JMA 模式预报(图 5b₃)和 NCEP 模式预报(图 5b₄)降水大值中心略向西偏,其中 JMA 的预报较为接近观测降水。通过 TS 评分集成方法,对于预报效果差的模式的改善较为显著。CMA 控制预报的降水中心明显偏北,且降水大值仅有 50.00 mm 以上,基于 TS 评分方法集成后的 CMA 预报(图 5c₁)在降水大值中心带分布上更接近观测降水的分布,在量级上也明显有提升,从原本的 50.00 mm 降水量级提升到了 80.00 mm,对于预报结论有了明显的

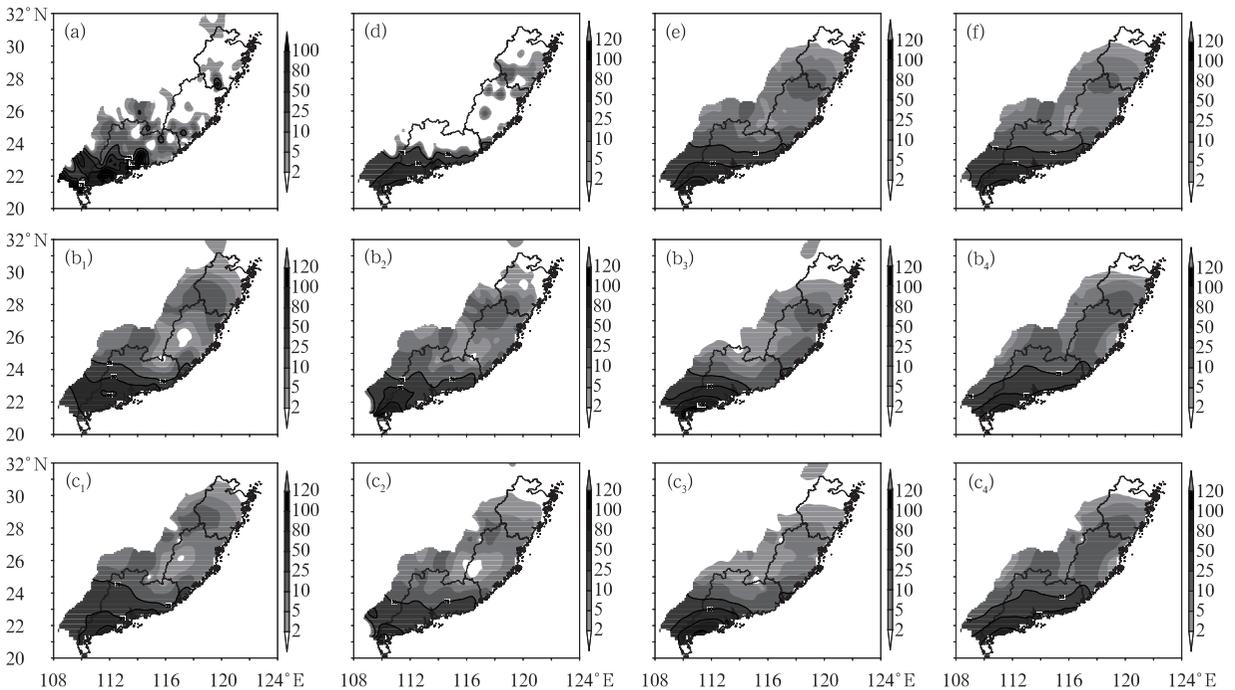


图 5 2009 年 9 月 14 日 20 时至 15 日 20 时受台风巨爵影响的降水预报和观测(单位:mm)

(a) 观测值, (b₁) CMA 控制预报, (b₂) ECMWF 控制预报, (b₃) JMA 控制预报, (b₄) NCEP 控制预报,

(c₁) CMA 集成预报, (c₂) EC 集成预报, (c₃) JMA 集成预报, (c₄) NCEP 集成预报,

(d) 基于 TS 评分总集成预报, (e) 基于 BS 评分总集成预报, (f) 基于算术平均法总集成预报

Fig. 5 Observed precipitation and forecasts during typhoon "Koppu" on 15 September 2009 (unit:mm)

(a) observation, (b₁) CMA control member, (b₂) ECMWF control member, (b₃) JMA control member,

(b₄) NCEP control member, (c₁) CMA precipitation integration, (c₂) EC precipitation integration,

(c₃) JMA precipitation integration, (c₄) precipitation integration, (d) precipitation integration based

on TS score, (e) precipitation integration based on BS score, (f) precipitation integration based

on arithmetic average method score

改善。尤其对于下一步的地质灾害气象预报有很大的意义。对于 ECMWF、JMA、NCEP 模式预报(图 5c₂~5c₄),集成后的降水预报改善较小,和控制预报在降水分布和量级上都较为一致。

对于 4 家模式的总的集成预报,相较于实况观测降水,基于 TS 评分法的总集成降水(图 5d)优势明显,在降水大值的空间分布上,显示了优越性,在模式预报降水量级普遍偏小的情况下,改善了预报量级,预报效果最优,其次是基于 BS 评分法(图 5e)的总集成预报,最后是基于算术平均法(图 5f)的总集成预报。集成后的降水预报集合了各家单一模式的

特点,就降水预报的稳定度而言,有了很大的改善。

4.2 非台风期降水个例分析

2009 年 9 月 18—19 日降水为非台风型降水。由图 6 可以看出,实际各个模式控制预报(图 6b₁~b₄)的降水预报效果都不理想,降水预报量级较实际观测(图 6a)偏小,降水中心也不稳定,在此基础上,仅用 TS 方法总集成后的预报(图 6d)降水量级较之单一模式从量级和降水大值中心位置的预报上更接近实际观测降水,对预报效果有较大改善,对于进一步的地质灾害预报有很好的指示作用。

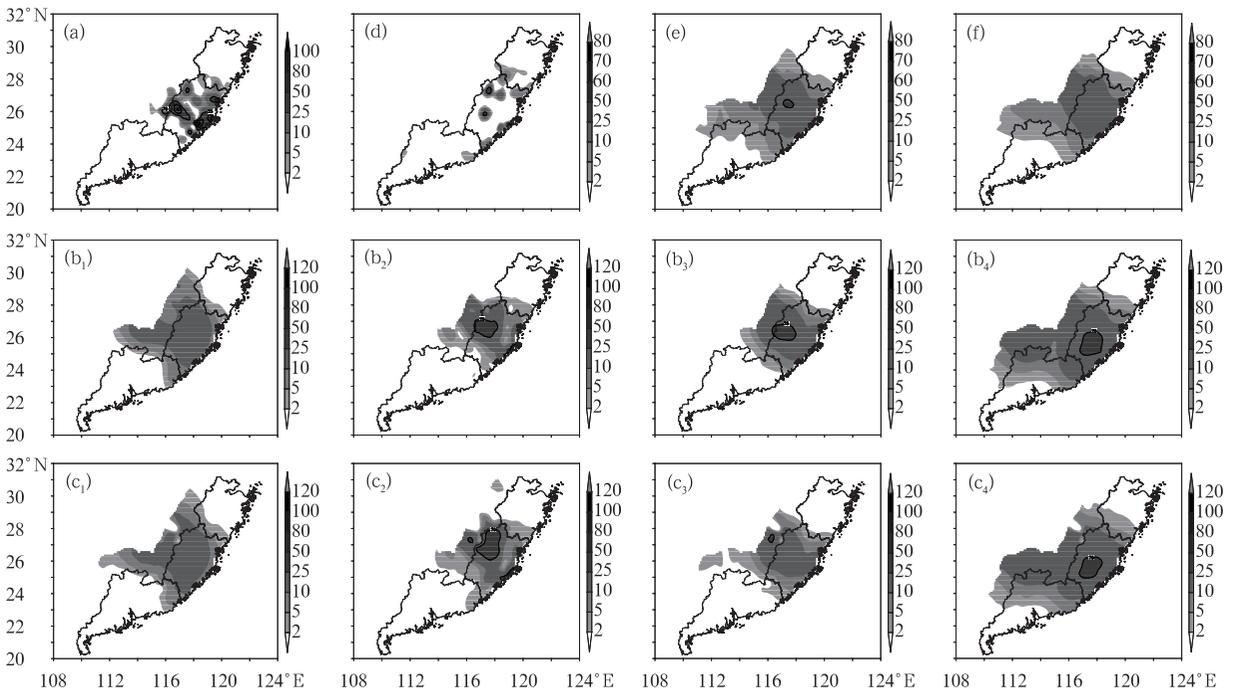


图 6 2009 年 9 月 18 日 20 时至 19 日 20 时的降水预报和观测(单位:mm)

- (a) 观测值, (b₁) CMA 控制预报, (b₂) EC 控制预报, (b₃) JMA 控制预报, (b₄) NCEP 控制预报,
- (c₁) CMA 集成预报, (c₂) ECMWF 集成预报, (c₃) JMA 集成预报, (c₄) NCEP 集成预报,
- (d) 基于 TS 评分总集成预报, (e) 基于 BS 评分总集成预报, (f) 基于算术平均法总集成预报

Fig. 5 Observed precipitation and forecasts on 15 September 2009 (unit: mm)

- (a) observation, (b₁) CMA control member, (b₂) EC control member, (b₃) JMA control member, (b₄) NCEP control member, (c₁) CMA precipitation integration, (c₂) EC precipitation integration, (c₃) JMA precipitation integration, (c₄) precipitation integration, (d) precipitation integration based on TS score, (e) precipitation integration based on BS score, (f) precipitation integration based on arithmetic average method score

5 结论和讨论

基于 TIGGE 多模式超级降水预报集成,能在单一模式或多模式预报均偏差较大的情况下,通过

TS 评分、BS 评分集成和简单的算术平均集成,明显改善单一模式的确定性降水预报带来的不确定性,可以抑制单个模式的随机误差并明显改进预报结果,使大雨以上量级的降水预报结论更为可靠,从而为泥石流灾害预报提供更好的格点降水预报。

本文基于 TIGGE 资料,对中国气象局(CMA)、欧洲中期天气预报中心(ECMWF)、美国国家环境预报中心(NCEP)和日本气象厅(JMA)的集合数值预报结果进行降水集成分析,采用算术平均法、TS 评分集成法和 BS 评分集成法进行对比分析,结果表明:基于 TS 评分的多模式降水集成法无论在分区降水评分中,还是在东南地区的台风型降水和非台风型降水实例中,都有效改进了大雨以上的降水预报效果。得到的主要结论如下:

(1) 基于 TS 评分方法的 TIGGE 降水多元集成方法,对降水趋势的预报最为稳定,能较好地集合各个预报模式中较为优质的预报,综合各家模式预报中的优点。在广东东南和浙江北部分区降水评分中有明显优势。在东南地区的台风型降水和非台风型降水实例中,针对大雨以上的降水,在落区及降水量级预报方面,对单一模式预报结论尤其是 CMA 模式的预报结论起到了很好的修正作用,大幅度缩小了单一模式预报和观测降水的平均绝对误差。因此,TS 集成方法是对于大雨预报的一种较优的集成方法。

(2) 据本次预报样本分析,基于 BS 评分方法的 TIGGE 降水多元集成是仅次于基于 TS 评分方法的集成方法,对预报效果有较大的改进,集成后的降水与观测降水更为接近,平均绝对误差大幅减小。

(3) 简单的算术平均集成方法是一种局部相对较优的集成方法。据本次预报样本分析,基于 TS 和 BS 评分方法优于简单的算术平均法集成的关键是为各模式赋权重,因此权重系数的选取对于集成降水预报较为重要,如何对 TS 评分高的集合模式预报成员设定高权重以及如何为 BS 评分好的集合模式设定高权重得到更优质的总集成预报结果,并将总集成降水引入地质灾害预报模型中进一步检验,值得在今后继续深入研究。

参考文献

包红军,赵琳娜. 2012. 基于集合预报的淮河流域洪水预报研究. 水利学报,43(2):216-224.

蔡其发,张立凤,张铭. 1999. 中期数值天气预报的集合预报试验. 气候与环境研究,12(4):365-373.

曹晓钟,闵晶晶,刘还珠,等. 2008. 分类与集成方法在降雨预报中的应用. 气象,34(10):3-11.

陈丽娟,许力,王永光. 2005. 超级集合思想在汛期降水预测集成中的

应用. 气象,31(5):52-54.

段明铿,王盘兴. 2004. 集合预报方法研究及应用进展. 南京气象学院学报,27(2):279-288.

冯汉中,肖红茹,徐琳娜,等. 2009. 基于数值预报模式降水产品的集成应用方法试验. 高原山地气象研究,29(3):39-43.

管成功,王克敏,陈晓红. 2006. 2002—2005 年 T213 数值降水预报产品分析检验. 气象,32(8):70-76.

马清,龚建东,李莉. 2008. 超级集合预报的误差订正与集成研究. 气象,34(3):42-48.

彭九慧,丁力,杨庆红. 2008. 几种降水集成预报方法的对比分析. 气象科技,36(5):520-523.

韦方强,江玉红,杨红娟,等. 2010. 东南地区泥石流活动与降水气候特征的分析. 山地学报,28(5):616-622.

严明良,缪启龙,沈树勤. 2009. 基于超级集合思想的数值预报产品变权集成方法探讨. 气象,35(6):19-25.

杨松,祀明辉,姚德宽. 2003. 差订正在预报集成中的应用研究. 气象,29(12):22-24.

尤凤春,魏东,王雨. 2009. 北京奥运期间多模式降水检验及集成试验. 气象,35(11):3-8.

张国平,许凤雯,赵琳娜. 2010. 中国降水型泥石流研究现状. 气象,36(2):81-86.

赵琳娜,包红军,田付友,等. 2012. 水文气象研究进展. 气象,38(2):129-146.

赵琳娜,吴昊,田付友,等. 2010. 基于 TIGGE 资料的流域概率性预报降水评估. 气象,36(7):133-142.

赵声蓉. 2006. 多模式温度集成预报. 应用气象学报,17(1):52-58.

周兵,赵翠光,赵声蓉. 2006. 多模式集合预报技术及其分析与检验. 应用气象学报,8(17):104-108.

周兵,郭幼君,何金海. 1999. 降水概率预报评分方法分析. 南京气象学院学报,22(3):367-373.

Bao Hongjun and Zhao Linna. 2012. Development and application of an atmospheric-hydrologic hydraulic flood forecasting model driven by TIGGE ensemble forecasts. Acta Meteor Sinica, 26(1):93-102, doi: 10.1007/s13351-012-0109-0.

Krishnamurti T N, Kishitawal C M, LaRow T, et al. 1999. Improved weather and seasonal climate forecasts from multimodel super-ensemble. Science, 285:1548-1550.

Liang Li, Zhao Linna, Gong Yuanfa, et al. 2012. Probability distribution of summer daily precipitation in the Huaihe Basin of China based on Gamma distribution. Acta Meteor Sinica, 26(1):72-84, doi:10.1007/s13351-012-0107-2.

Zhao Linna, Tian Fuyou, Wu Hao, et al. 2011. Verification and comparison of probabilistic precipitation forecasts using the TIGGE data in the upriver of Huaihe Basin. Advances in Geosciences, 29:95-102.

Zhao Linna, Qi Dan, Tian Fuyou, et al. 2012. Probabilistic flood prediction in the upper Huaihe catchment using TIGGE data. Acta Meteor Sinica, 26(1):62-71, doi:10.1007/s13351-012-0106-3.