

# 基于贝叶斯模式平均的大渡河流域 集合降水概率预报研究

钟逸轩<sup>1</sup>, 吴裕珍<sup>2,3</sup>, 王大刚<sup>2,3</sup>, 孔冬冬<sup>2</sup>

(1. 武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室, 湖北 武汉 430072; 2. 中山大学水资源与环境系, 广东 广州 510275; 3. 华南地区水循环与水安全广东省普通高校重点实验室, 广东 广州 501275)

**摘要:**基于 TIGGE 数据的五个单中心集合预报结果(CMA、CMC、ECMWF、NCEP、UKMO)构成的多中心超级集合预报系统的降水量预报, 以及相应时段的实测降水量值, 应用贝叶斯模式平均法(Bayesian Model Averaging, BMA)建立大渡河流域的 BMA 概率预报模型。通过 CRPS、MAE、BS 三种评价指标, 对大渡河流域的 BMA 降水概率预报模型进行评价与检验, 三种指标均显示 BMA 降水概率预报比原始集合预报具有更高的准确性, 其中 BMA 模型的 CRPS 和 MAE 指标均值分别相比原始集合预报减少了 31.6% 和 23.9%; 分析模型权重参数, 得出 ECMWF 对大渡河流域 BMA 降水预报贡献最大, 即 ECMWF 对研究区域降水预报效果最好; 模型对大渡河流域极端降水预报效果较差, 常低估极端降水量。

**关键词:**大渡河流域; 降水概率预报; 贝叶斯模式平均; 集合预报

中图分类号: TV125

文献标识码: A

文章编号: 1000-0852(2016)01-0008-07

## 1 引言

天气预报发展至今, 其形式大体可分为四种: 定性预报、定量预报、形态预报、概率预报<sup>[1]</sup>。研究表明, 任何天气预报均存在无法克服的不确定性。相较定量预报, 概率预报能够描述天气预报的不确定性, 又可以反映预报的不确定程度, 适应社会发展的需要。伴随集合预报的出现, 概率预报得到了极大的发展。集合预报具有更高的技巧性, 能够增加长预报时效的预报精度。基于集合预报的降水概率预报较定量预报具有更高的一致性。由于在获取集合预报的过程中, 数值模式和集合方法存在一些缺陷, 直接采用集合预报推求降水概率分布曲线得到的原始集合预报, 其结果往往不能很好地表征预报不确定性。

近年来, 学者们通过运用贝叶斯理论, 探索克服这些缺陷的方法。贝叶斯理论是概率统计学的一个分支, 其核心是英国学者 Bayes<sup>[2]</sup>于 1763 年提出的贝叶斯公式:

$$P(A|B) = \frac{P(A)P(B|A)}{P(B)} \quad (1)$$

式中:  $P(A)$  和  $P(B)$  分别为事件  $A$  和事件  $B$  发生的概率, 其值均大于 0;  $P(A|B)$  表示事件  $B$  发生条件下事件  $A$  发生的概率;  $P(B|A)$  表示事件  $A$  发生条件下事件  $B$  发生的概率。

贝叶斯理论应用于水文气象领域大约始于 20 世纪 90 年代, 并逐渐成为水文不确定性研究的主要研究方法之一。在单值预报产品应用中, Kyzysstofowicz<sup>[3]</sup>提出贝叶斯产品处理技术 (Bayesian Processor of Output, BPO), 并将其运用于预报值先验概率的修订, 得到预报值的累积概率预报或概率密度预报。基于近年逐渐成熟的集合预报, Raftery<sup>[4]</sup>等于 2005 年提出运用贝叶斯模式平均 (Bayesian Model Averaging, BMA) 来结合不同来源的预报结果, 得到不同成员的概率密度函数及其权重, 进而求得贝叶斯模式平均概率预报, 并将 BMA 运用于服从正态分布的地表温度和海平面气压的概率预报上以及不服从正态分布的降水量和风速

收稿日期: 2014-11-03

基金项目: 国家自然科学基金项目 (37000-41030451); 国家重点基础研究 973 项目 (2013CB036400)

作者简介: 钟逸轩 (1992-), 男, 江西宜春人, 硕士研究生, 主要从事水文水资源方向的研究。E-mail: zhongyx\_92@163.com

通讯作者: 王大刚 (1975-), 男, 河北张家口人, 副教授, 主要从事陆地过程模拟、城市化的气候效应研究。E-mail: wangdag@mail.sysu.edu.cn



上。Sloughter<sup>[5]</sup>等给出了 BMA 降水概率预报模型参数与降水量之间的关系。马培迎<sup>[6]</sup>运用贝叶斯原理,修正二值降水概率预报的结果,提高了算例预报效果成绩 16.6%,并认为贝叶斯理论能成功地修正概率预报。陈朝平<sup>[7]</sup>等在 Kyzysztowicz 研究基础上,运用贝叶斯原理,改进四川地区集合概率预报,提高预报准确性。梁莉<sup>[8]</sup>等运用贝叶斯模式平均得到淮河流域降水概率预报,并将结果应用于水文预报模型做出水文概率预报,模拟结果与实况较为吻合。韩焱红<sup>[9]</sup>等采用连续等级概率评分(Continuous Ranked Probability Scores, CRPS)评价由 BPO 得到的集成贝叶斯降水概率预报与直接由集合预报做出的概率预报,认为前者具有更好的可靠性。Fraley<sup>[10]</sup>等将 BMA 方法推广到部分观测值缺失和考虑预报成员可替换性的情况下,刘建国<sup>[11]</sup>等以淮河流域降水数据为例对此进行研究,结果表明考虑可替换性之后,模型计算大大简化,效果良好。

基于国内外学者的研究,可以认为贝叶斯理论能够较好地克服集合概率预报的不确定性,得到更有预报价值的概率预报。降水量预报属于天气预报的一种,也存在不确定性,本文根据 Raftery<sup>[4]</sup>等于 2005 年提出的 BMA 方法,利用 TIGGE 数据中 CMA、CMC、ECMWF、NCEP、UKMO 等 5 个中心的不同时段长集合预报数据,建立大渡河流域降水预报 BMA 模型,以提高降水预报的准确性。

## 2 方法和数据

### 2.1 贝叶斯模式平均(BMA)

BMA 方法是一种基于贝叶斯理论的数据后处理方法,并能针对预报值得到具有预报效果的概率密度函数(Probability Density Function, PDF)。贝叶斯理论认为,样本的概率分布参数是随机的,因此需通过先验数据来推求后验参数,BMA 方法即通过一定的评判准则,给出各个预报成员的 PDF 参数及其所占权重,最终得到 BMA-PDF。Raftery<sup>[4]</sup>等给出了一整套方法。

设  $k$  成员的 PDF 为  $p(y|f_k)$ ,其 BMA 权重为  $\omega_k$ ,可以得到 BMA-PDF 最终形式为:

$$p(y|f_1, f_2, \dots, f_K) = \sum_{k=1}^K \omega_k p(y|f_k) \quad (2)$$

式中: $y$  为预报变量,本文指降水量; $f_k$  为降水集合预报第  $k$  个成员的预报值; $K$  为成员总数; $\sum_{k=1}^K \omega_k = 1$  且  $\omega_k > 0$ ,反映了每个集合预报成员在模型训练阶段对预报技

巧的相对贡献度。

降水量是一种非负值且近似服从 Gamma 分布,因此其 BMA 模型需要分别推算  $p=0$  处的点密度以及  $p>0$  时的 Gamma 分布参数。Raftery<sup>[4]</sup>等研究表明,BMA 模型参数拟合过程中,将降水量的立方根作为输入数据效果更好。

采用 logistic 回归推求  $p=0$  处的概率,有:

$$\text{logistic}P(y=0|f_k) = \ln\left(\frac{P(y=0|f_k)}{P(y>0|f_k)}\right) = a_0 + a_1 f_k^{1/3} + a_2 \phi_k \quad (3)$$

式中: $a_0, a_1, a_2$  为模型参数; $\phi_k$  为示性函数,当  $f_k=0$  时,  $\phi_k=1$ , 否则为 0。

采用 Gamma 分布拟合降水概率密度函数,有:

$$g_k(y|f_k) = \frac{1}{\beta_k^{\alpha_k} \Gamma(\alpha_k)} y^{\alpha_k-1} e^{-\frac{y}{\beta_k}} \quad (4)$$

式中: $\alpha_k$  和  $\beta_k$  分别为第  $k$  个成员 Gamma 分布的形状参数和尺度参数; $\Gamma(\cdot)$  为 Gamma 函数; $y$  为降水量的立方根; $y \geq 0$  且当  $y=0$  时,  $g_k(y|f_k)=0$ ;  $f_k > 0$ 。

Gamma 分布均值  $\mu_k$  和方差  $\sigma_k^2$  与  $\alpha_k, \beta_k$  关系为:

$$\mu_k = \alpha_k \beta_k \quad (5)$$

$$\sigma_k^2 = \alpha_k \beta_k^2 \quad (6)$$

研究表明<sup>[5,8]</sup>,降水分布的均值  $\mu_k$  和方差  $\sigma_k^2$  可与  $f_k$  建立如下近似关系:

$$\mu_k = b_{0k} + b_{1k} f_k^{1/3} = b_{0k} + b_{1k} y \quad (7)$$

$$\sigma_k^2 = c_{0k} + c_{1k} f_k \quad (8)$$

式中: $b_{0k}, b_{1k}, c_{0k}, c_{1k}$  为第  $k$  个成员的待求系数; $f_k > 0$ 。

实际应用中,各中心集合预报各成员仅在输入初始条件时添加了微小扰动,各成员的  $c_{0k}$  和  $c_{1k}$  相差不大,可以认为其相等且分别为  $c_0$  和  $c_1$ <sup>[8]</sup>,因此式(8)可以表示为:

$$\sigma_k^2 = c_0 + c_1 f_k \quad (9)$$

式中: $c_0, c_1$  为第  $k$  个成员的待求系数; $f_k > 0$ 。

结合式(2)可以得到 BMA-PDF 的最终形式:

$$p(y|f_1, f_2, \dots, f_K) = \sum_{k=1}^K \tilde{\omega}_k [P(y=0|f_k)I(y=0) + P(y>0|f_k)g_k(y|f_k)I(y>0)] \quad (10)$$

式中: $I(\cdot)$  为示性函数,满足括号内条件时  $I(\cdot)=1$ , 否则  $I(\cdot)=0$ ;其余各项意义同上。

模型参数计算较为复杂,本文采用 Raftery<sup>[4]</sup>使用的极大化期望值算法 (Expectation-Maximization Method, EM),此方法较为简单,往往只能获得局部最



优解,但运算速度快,适合解决本文研究的问题。

## 2.2 BMA 模型结果评价

本文采用 3 种指标对 BMA 模型结果作出评价,3 种指标均为越小越好。

(1)Brier 评分。Brier 评分(Brier Score,BS)最早由美国学者 Brier 于 1950 年提出<sup>[12]</sup>,其计算方法为:

$$B = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (F_i - Q_i)^2 \quad (11)$$

式中: $N$  为预报总次数; $F_i$  为第  $i$  次预报对应的概率; $Q_i$  为第  $i$  次预报对应的实际降水情况,降水出现则为 1,不出现则为 0。

$B=1$  表示预报毫无技巧, $B=0$  表示完美预报。

(2) 排序概率评分。排序概率评分(Continuous Ranked Probability Score,CRPS)表示观测和预报的累积分布函数之间误差平方的总和,其计算方法为:

$$S = \int_{-\infty}^{\infty} (p_i(x) - o_i(x))^2 dx \quad (12)$$

式中: $x$  表示待预测变量; $p_i(x)$  表示概率预报累积概率; $o_i(x)$  表示真实值的累积概率。

(3)平均绝对误差。平均绝对误差(Mean Absolute Error,MAE)表征了预报误差,其计算方法为:

$$E = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |\hat{x}_i - x_i| \quad (13)$$

式中: $N$  为预报总次数; $\hat{x}_i$  为预报值; $x_i$  为真实值。

完美预报时, $E=0$ ;否则  $E>0$  且越大表示预报值与真实值之间误差越大,预报效果越差。本文中,对于 BMA 概率预报,取其中位数(50% 累计概率对应的预报值)作为确定性预报值。

## 2.3 研究区域概况

大渡河流域位于我国四川省中西部,全长 1 062 km,流域面积 77 400 km<sup>2</sup>,是岷江最大的一级支流。其地势以泸定为界划分为两部分<sup>[13]</sup>:泸定以上流域高程一般在 3 000 m 以上,多 4 000~5 000 m 山峰;泸定以下的分水岭有部分较低的垭口,高程约 2 000 m,是水汽流动的主要通道。

汛期 6~10 月水量占全年的 70% 以上,由于气候及下垫面等因素,泸定以上流域,地势高亢,水汽不足,暴雨极少,几乎无日雨量 50 mm 以上的暴雨记录。吴付华<sup>[14]</sup>等研究发现,泸定以下流域地势渐低,雨区分布呈多中心,但主要暴雨区只有两个,且大部分地区一日最大单点暴雨在 100 mm 以下。总体而言,大渡河流域降水较为充沛,径流稳定,较少出现暴雨。

## 2.4 研究数据

本文所采用的观测数据为大渡河流域 67 个雨量站 2013 年 8 月和 9 月的实测逐时降雨量;集合预报数据来源于全球交互式大集合(TIGGE)同时期的 CMA、CMC、ECMWF、NCEP、UKMO 五个中心的日降雨量预报结果,累积时段分别为 6h、12h、24h、48h 和 120h,起报时间为格林威治时间每日 00 点,输出数据空间分辨率均为 0.5°×0.5°。各预报中心相关信息见表 1。大渡河流域 DEM 图及雨量站分布情况如图 1 所示,由图可直观得到,大渡河雨量站分布规律为下游密度较大,上游相对稀疏。

表1 研究采用的TIGGE预报中心相关信息  
Table1 Information of the five TIGGE centers concerned in this research

中心	国家/地区	集合成员数	原始空间分辨率	预报时效/d
CMA	中国	15	0.5525°×0.5625°	1~16
CMC	加拿大	21	600×300 Gaussian global grid	1~16
ECMWF	欧洲	51	1°×1°	1~10/11~15
NCEP	美国	21	1°×1°	1~10
UKMO	英国	24	0.8333°×0.5555°	1~15

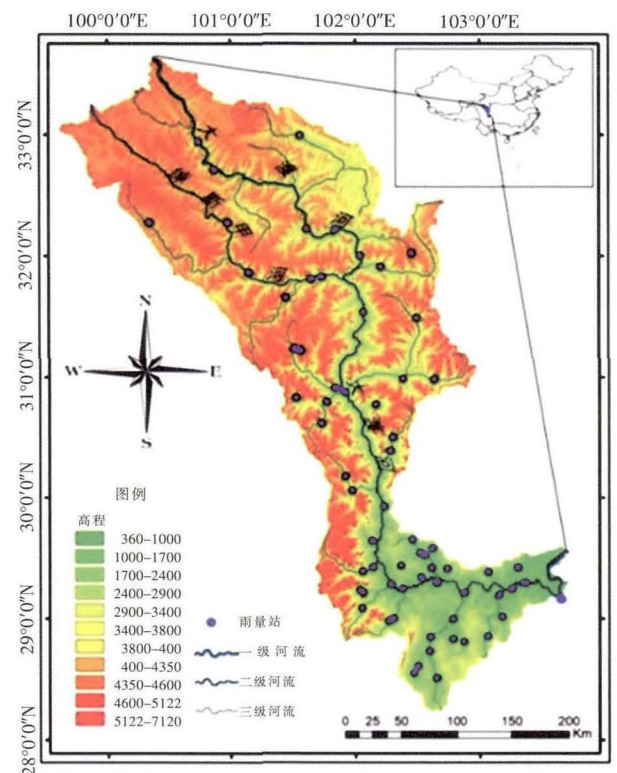


图1 大渡河流域图  
Fig.1 The Daduhe River basin

### 3 研究结果

#### 3.1 验证期各预报中心权重

BMA 模型参数中的权重参数反映了各成员对模型的贡献度,其值介于 0~1 之间。图 2 绘制了五种预见期长度下,各预报中心对应模型验证期(8 月 31 日~10 月 1 日)的权重值。

总体而言,ECMWF 的权重值在各个预见期下均较高,CMA 权重值在 12h 和 24h 预见期下较高,NCEP 在 48h 和 120h 预见期下有较高值,而 CMC 和 UKMO

在几乎所有预见期下都很小,仅 UKMO 在 120h 预见期的部分验证期内有较高权重。可以认为对于大渡河流域降水预报,ECMWF 均有较高的准确度,CMA 对于短时段降水预报有较好的效果,NCEP 在中长预见期下有较好效果,CMC 和 UKMO 则基本对大渡河流域的降水预报参考意义不大。

预见期为 120h 时,各中心权重随时间的变化是杂乱无章的,同一个中心权重值的波动也比较大。可见,选取的五个预报中心对长预见期降水预报的精度稳定性均不高,存在较大的随机性。

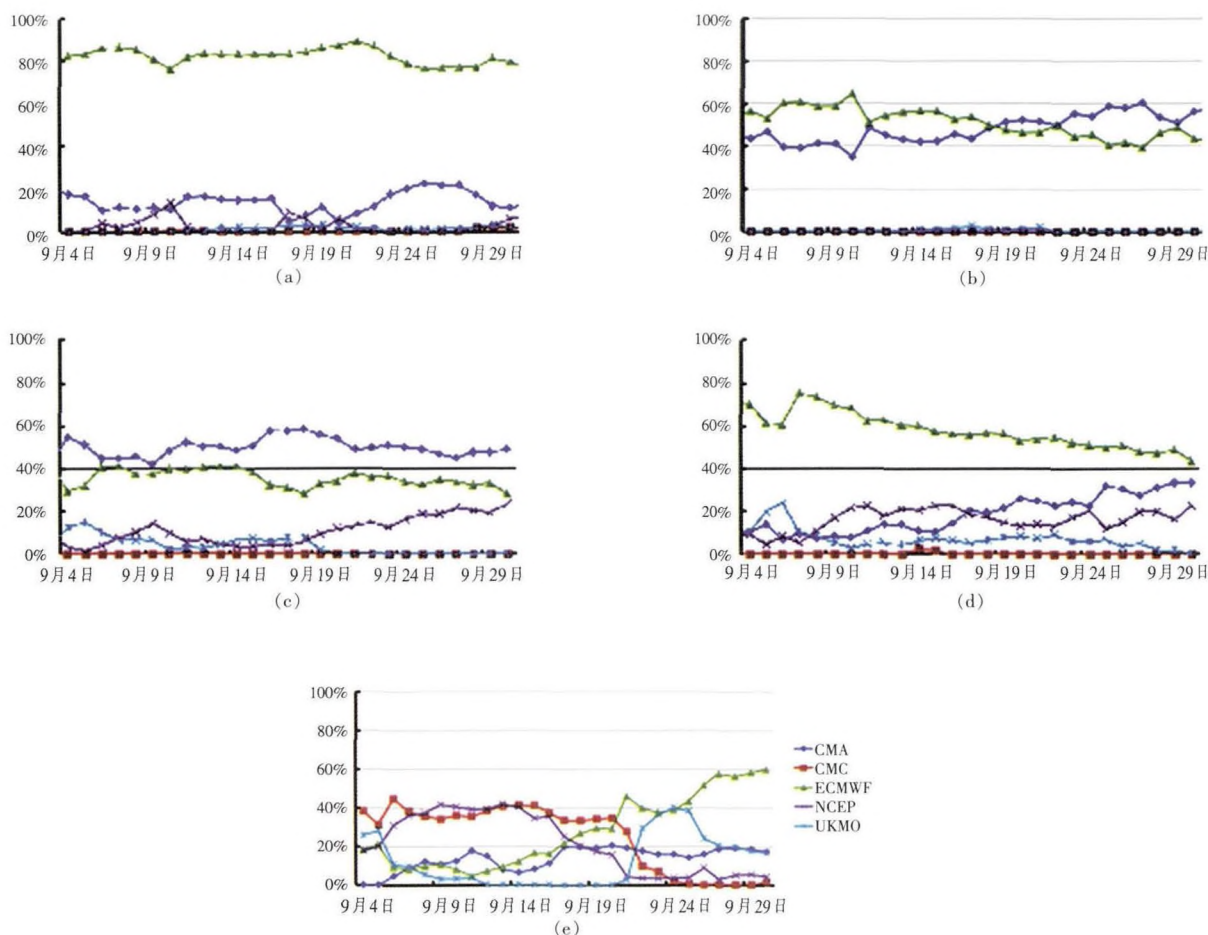


图 2 8 月 31 日~9 月 30 日不同预见期各中心 BMA 权重值预见期分别为(a)6h (b)12h (c)24h (d)48h (e)120h  
Fig.2 The BMA weights of the various forecast centers (CMA, CMC, ECMWF, NCEP, UKMO) under different lead time during Aug., 31~Sept.,30. 2013. The lead time: (a)6h, (b)12h, (c)24h, (d)48h, (e)120h

#### 3.2 BMA 百分位预报分析

BMA 概率预报模型的一个特点是给出了降水预测值的 PDF 而非单一数值的确定性预报,可定量给出各降水量级出现概率,因此理论上可用 BMA 概率预报预测极端事件。下面以兴隆站、红旗站和灯塔站为

例,分析 BMA 概率预报的百分位预报能力。兴隆站、红旗站位于大渡河流域的下游,灯塔站位于流域的上游。限于篇幅,本文仅将兴隆站 2013 年 8 月 31 日至 2013 年 9 月 30 日各预见期的 BMA 百分位预报与实测图列出(图 3)。



检验期内兴隆站的实测降水值除极个别值(如12h第24天)以外,均位于预报区间的5%~95%分位范围,即有效预报区间内,说明BMA概率预报有效地捕捉到了降水的观测值。此外,随着预见期的增加,90%预测区间长度也逐渐增大,体现出降水预报的不确定性增加。

取BMA概率预报的50%分位数作为BMA确定性预报。对于非极端降水,实测降水量点据均较为紧密地分布在50%分位预报值附近,然而对于极端降水事

件,往往与50%分位值相差较大。

对极端降水事件进一步分析可知,预见期为12h、24h和48h时,即使是95%分位的极大值预报,也无法很好地捕捉到极端降水事件,这三种预见期的检验期内最大值均未被95%分位值包括在内,反应出BMA概率预报对中等时段长的极端降水事件不灵敏。但对于短时段,BMA概率预报很好地捕捉到了其发生的可能性,6h分位图验证期的第24天,BMA各分位的预报值都形成了一个突出的峰状。

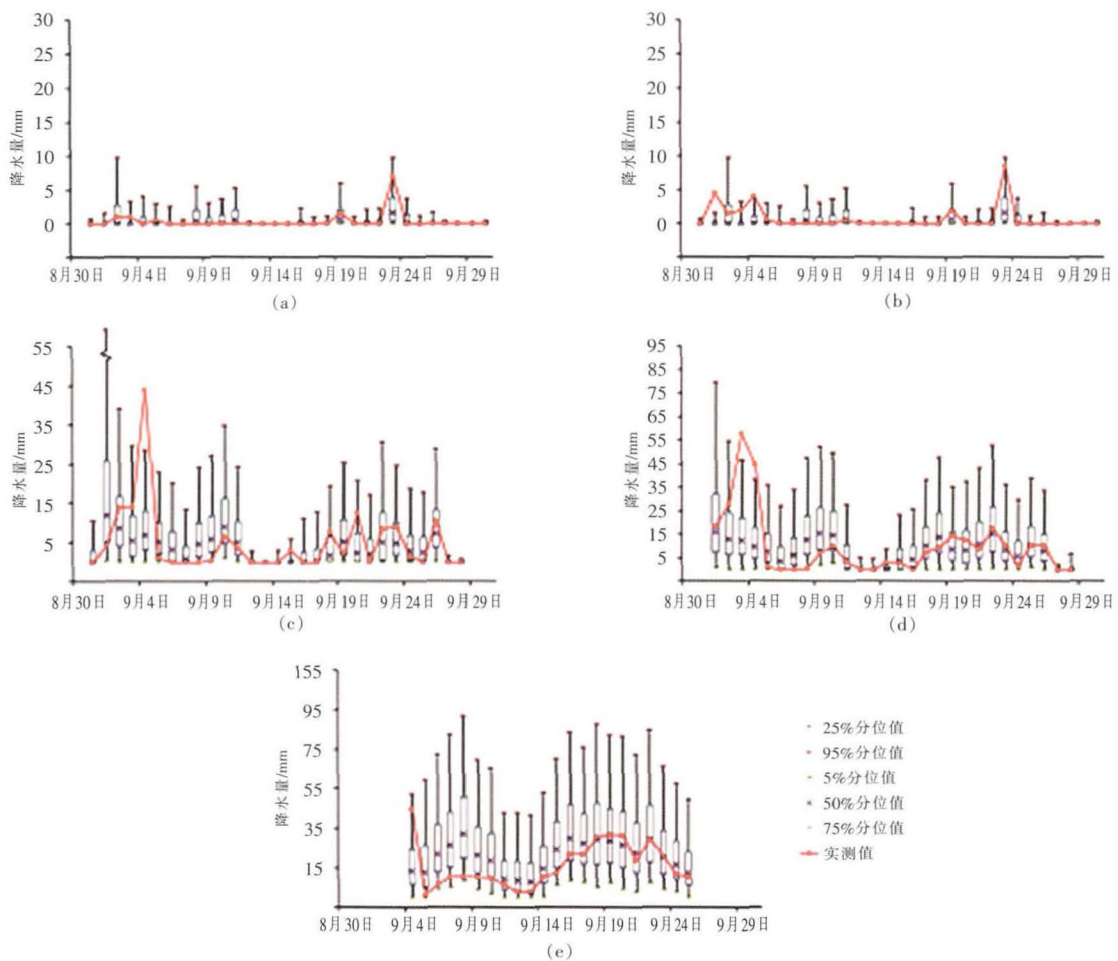


图3 兴隆站降水百分位预报,预见期分别为(a)6h (b)12h (c)24h (d)48h (e)120h  
Fig.3 The precipitation percentile forecasts of the Xinglong station. The lead time: (a)6h, (b)12h, (c)24h, (d)48h, (e)120h

红旗站的降水百分位预报结果同样表明,BMA概率预报的有效预报区间能够基本覆盖降水观测值。此外,红旗站12h预见期的BMA确定性预报存在较多的空报情况。相对于兴隆站,红旗站的BMA概率预报能较好地捕捉极端降水事件。48h预见期的BMA概率预报体现出了2013年9月16日、17日出现较大降水的可能性,预见期120h的BMA概率预报也较好地

捕捉到了9月10日~14日的暴雨信息,为极端降水预警提供了参考。

灯塔站BMA预报结果显示,中时段的极端降水值均与BMA确定性预报接近;但是短时段BMA预报仍然无法捕捉到极端降水信息。这个现象可能是灯塔站位于流域上游,降水较少,导致长时段预报误差平均化导致的。

综上,我们认为运用BMA对大渡河流域进行概率预报对于非极端降水事件能够取得良好的预报效果,但对极端降水事件进行预测的能力则显得不足。

3.3 统计评分分析

分别采用2.2中的3种方法对原始集合预报与BMA概率预报进行评价。

(1)Brier评分。依次选取0、0.1、0.2、0.3、0.4、0.5作为判定是否出现降水的阈值,得到表2所示的Brier评分结果。

对于大渡河流域降水预报的各预见期,Brier评分表明BMA概率预报比原始集合预报得分更小,具有更好的预报效果。对于中短历时降水预报,这种优势十分明显,BMA概率预报的Brier评分较原始集合预报均减少50%以上。

此外,随着预见期增加,Brier评分呈现出减小的趋势。赵琳娜<sup>[15]</sup>等和Pappenberger<sup>[16]</sup>等在进行相关研究时均得到与本研究类似的结果。据Mullen<sup>[17]</sup>等分析,可能原因是随着预见期的增加,模式误差逐渐加大,预报降水量精度逐渐降低,进而Brier评分减小。

表2 不同预见期的大渡河流域原始降水集合预报与BMA概率预报Brier评分对比  
Table2 The comparison of BS scores between raw ensemble forecast and probabilistic forecast calibrated by BMA for different lead times

阈值	6h		12h		24h		48h		120h	
	原始	BMA	原始	BMA	原始	BMA	原始	BMA	原始	BMA
0	0.6255	0.1553	0.5333	0.1674	0.3180	0.1219	0.2084	0.0834	0.0427	0.0402
0.1	0.4566	0.1553	0.4283	0.1675	0.2598	0.1217	0.1811	0.0834	0.0427	0.0409
0.2	0.3960	0.1555	0.4055	0.1679	0.2351	0.1220	0.1653	0.0837	0.0428	0.0415
0.3	0.3558	0.1559	0.3871	0.1686	0.2183	0.1226	0.1567	0.0842	0.0424	0.0420
0.4	0.3230	0.1566	0.3690	0.1698	0.2060	0.1234	0.1485	0.0848	0.0419	0.0426
0.5	0.3453	0.1114	0.4470	0.1476	0.2529	0.1323	0.1725	0.0893	0.0512	0.0481

(2)CRPS评分。表3是原始集合预报与BMA概率预报的CRPS评分结果。总体而言,BMA概率预报的CRPS评分结果均显著优于原始集合预报,平均减少了31.6%,十分显著。随着预见期的递增,原始集合预报与BMA概率预报的CRPS评分值都快速上升,说明所选取的5个预报中心的TIGGE数据对于长时段降水预报准确性不如短时段预报。

(3)MAE评分。MAE评分能够表征预报结果与实际值之间的误差大小。表4是原始集合预报与BMA概率预报的MAE评分。

MAE评分结果同样显示BMA概率预报相对于原始集合预报具有更高的准确性,其平均MAE值减少了约23.9%。对于日降水预报,BMA概率预报在验证期的误差平均水平在4mm以内,具有较高的精度。

表4 不同预见期的大渡河流域原始降水集合预报与BMA概率预报MAE评分对比  
Table4 The comparison of MAE scores between raw ensemble forecast and probabilistic forecast calibrated by BMA for different lead times

预见期/h	6	12	24	48	120
原始	1.0622	2.2880	4.6781	8.2203	17.0860
BMA	0.6572	1.3110	3.8008	6.9728	12.6359

4 结论

基于TIGGE数据集5个预报中心2013年8、9月的集合预报数据,选取预报时效6h、12h、24h、48h和120h的数据,对大渡河降水应用BMA概率预报进行研究,并运用CRPS、BS、MAE评价指标对研究区域的BMA预报结果进行评估,主要得到以下结论:

(1)BMA概率预报相较于原始集合概率预报具有更高的准确性。选取的三种评价指标Brier评分、MAE、CRPS均显示,对于不同预见期,BMA概率预报均具有更好的得分,可以将其运用于大渡河流域以提

表3 不同预见期的大渡河流域原始降水集合预报与BMA概率预报CRPS评分对比  
Table3 The comparison of CRPS scores between raw ensemble forecast and probabilistic forecast calibrated by BMA for different lead times

预见期/h	6	12	24	48	120
原始	0.8033	1.8117	3.7120	6.6283	13.7004
BMA	0.4813	0.9387	2.7604	4.8815	9.1732



高降水预报的准确性。

(2) 通过研究五个预报中心的 BMA 权重, 可知 ECMWF 对于大渡河流域长、短时段降水预报均具有较高的准确度, CMA 对于短时段降水预报有较好的效果, NCEP 在中长预见期下有较好效果, CMC 和 UKMO 则基本对大渡河流域降水预报参考意义不大。

(3) 对于大渡河流域长时段预报, 研究选取的五个中心均不能稳定地提供可靠预报, 说明长时段预报不确定性未能得到较好的模拟, 相关技术有待进一步改进。

(4) 对兴隆、红旗、灯塔 3 个雨量站进行百分位预报分析, 可知 BMA 概率预报总的来说能够很好地预报降水, 但对于大渡河流域暴雨事件其灵敏度不高, 常出现“漏报”情况。因此, 不建议使用 BMA 预报对大渡河流域进行洪涝灾害预警。

总体而言, 对大渡河集合预报产品应用 BMA 概率预报, 提高了集合预报的准确性, 但是仍然存在误报和漏报的现象。提高降水预报效果可以从多个方面进行, 比如校正模式的系统误差, 优化模型参数的计算方法, 采用其他分布拟合降水概率密度函数等, 相关问题将在今后进一步深入研究。

#### 参考文献:

- [1] 周兵, 雷振发. 北京降水概率预报业务试验 [J]. 大气科学, 1998, 22(3): 336–342. (ZHOU Bing, LEI Zhenfa. An operational experiment of precipitation probability forecast over Beijing [J]. Scientia Atmospherica Sinica, 1998, 22(3): 336–342. (in Chinese))
- [2] Thomas Bayes. An Essay towards solving a problem in the doctrine of chances [J]. Philosophical Transactions, 1763, 53: 370–418.
- [3] Krzysztofowicz R, H D Herr. Hydrologic uncertainty processor for probabilistic river stage forecasting: precipitation-dependent-model [J]. Hydrol, 2001, 249(1–4): 46–68.
- [4] Raftery A. Using Bayesian model averaging to calibrate forecast ensembles [J]. Monthly Weather Review, 2005, 133(5): 1155–1174.
- [5] Sloughter J M L, Raftery A E, Gneiting T, et al. Probabilistic quantitative precipitation forecasting using Bayesian model averaging [J]. Monthly Weather Review, 2007, 135(9): 3209–3220.
- [6] 马培迎. 应用贝叶斯原理修正降水概率预报 [J]. 气象科技, 1999, (1): 45–48. (MA Peiying. Using Bayesian theory to correct Precipitation probability forecast [J]. Meteorological Science and Technology, 1999, (1): 45–48. (in Chinese))
- [7] 陈朝平, 冯汉中, 陈静. 基于贝叶斯方法的四川暴雨集合概率预报产品释用 [J]. 气象, 2010, 36(5): 32–39. (CHEN Chaoping, FENG Hanzhong, CHEN Jing. Application of Sichuan heavy rainfall ensemble prediction probability products based on bayesian method [J]. Meteorological Monthly, 2010, 36(5): 32–39. (in Chinese))
- [8] 梁莉, 赵琳娜, 齐丹, 等. 基于贝叶斯原理降水订正的水文概率预报试验 [J]. 应用气象学报, 2013, 24(4): 416–424. (LIANG Li, ZHAO Linna, QI Dan, et al. The experiment of hydrologic probabilistic forecast based on the precipitation forecast calibrated by Bayesian model averaging [J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2013, 24(4): 416–424. (in Chinese))
- [9] 韩焱红, 矫海燕, 陈静, 等. 基于贝叶斯理论的集合降水概率预报方法研究 [J]. 气象, 2013, 39(1): 1–10. (HAN Yanhong, JIAO Haiyan, CHEN Jing, et al. Study on the method of rainfall ensemble probability forecast based on Bayesian theory and its preliminary experiments [J]. Meteorological Monthly, 2013, 39(1): 1–10. (in Chinese))
- [10] Fraley C, Raftery A E, Gneiting T. Calibrating multimodel forecast ensembles with exchangeable and missing members using Bayesian model averaging [J]. Monthly Weather Review, 2010, 138(1): 190–202.
- [11] 刘建国, 谢正辉, 赵琳娜, 等. 基于 TIGGE 多模式集合的 24h 气温 BMA 概率预报 [J]. 大气科学, 2013, 37(1): 43–53. (LIU Jianguo, XIE Zhenghui, ZHAO Linna, et al. BMA probabilistic forecasting for the 24-h TIGGE multi-model ensemble forecasts of surface air temperature [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2013, 37(1): 43–53. (in Chinese))
- [12] Glenn W. Brier. Verification of forecasts expressed in terms of probability [J]. Monthly Weather Review, 1950, 78(1): 1–3.
- [13] 程珂, 周东升, 李铭, 等. 大渡河流域近 51 年降水径流特征分析 [J]. 水电能源科学, 2013, 31(2): 5–8. (CHENG Ke, ZHOU Dongsheng, LI Ming, et al. Characteristic analysis of precipitation and runoff in Daduhe River in last 51 years [J]. Water Resources and Power, 2013, 32(2): 5–8. (in Chinese))
- [14] 吴付华, 樊明兰, 程琳. 大渡河干流暴雨洪水特性初步分析 [J]. 四川水力发电, 2013, 32(1): 4–7. (WU Fuhua, FAN Minglan, CHENG Lin. A preliminary analysis of characteristics of rainstorm floods in Daduhe basin [J]. Sichuan Water Power, 2013, 32(1): 4–7. (in Chinese))
- [15] 赵琳娜, 吴昊, 田付友, 等. 基于 TIGGE 资料的流域概率性降水预报评估 [J]. 气象, 2010, 36(7): 133–142. (ZHAO Linna, WU Hao, TIAN Fuyou, et al. Assessment of probabilistic precipitation forecasts for the Huanhe basin using TIGGE data [J]. Meteorological Monthly, 2010, 36(7): 133–142. (in Chinese))
- [16] Pappenberger F, Bartholmes J, Thielen J, et al. New dimensions in early flood warning across the globe using grand-ensemble weather predictions [J]. Geophys Res Lett, 2008, 35, L10404, doi: 10.1029/2008GL033837.
- [17] Mullen S L, Buizza R. Quantitative precipitation forecasts over the United States by the ECMWF ensemble prediction system [J]. Monthly Weather Review, 2001, 129(4): 638–663.

(下转第 57 页)

- evaluating instream ecological flow [J]. Progress in Natural Science, 2007,17(1):42–48. (in Chinese))
- [25] 刘苏峡,莫兴国,夏军,等. 用斜率和曲率湿周法推求河道最小生态需水量的比较[J]. 地理学报, 2006,61(3):273–281. (LIU Suxia, MO

Xingguo, XIA Jun, et al. Uncertainty analysis in estimating the inimum ecological instream flow requirements via wetted perimeter method: curvature technique or slope technique[J]. Acta Geographica Sinica, 2006,61(3):273–281. (in Chinese))

## Assessment of Hydrological Regime Alteration and Ecological Flow at Meigang Station of Xinjiang River

LIU Guihua<sup>1,2</sup>, ZHU Jingxuan<sup>2</sup>, XIONG Mengya<sup>2</sup>, WANG Dian<sup>2</sup>, QI Shuhua<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory of Poyang Lake Wetland and Watershed Research, Ministry of Education, Jiangxi Normal University, Nanchang 330022, China; 2. School of Geography and Environment, Jiangxi Normal University, Nanchang 330022, China)

**Abstract:** The daily discharge at the Meigang Station of the Xinjiang River from 1953 to 2010 was selected and divided into two stages namely the original watershed (1953–2001) and the drainage with human impact (2002–2010), based on the running time of the Jiepai Reservoir. The range of variability approach (RVA) which was proposed by Richer was used to study hydrological situation change. Then, the mean value and the difference values of RVA targets were used for estimating monthly ecological flow and transferable water at the Meigang station of the Xinjiang River. The results of ranked median degrees of 33 hydrologic alteration indicators indicate that about 22 indicators had highest or higher change and 11 indicators changed a little. The impacts of the Jiepai Reservoir on the hydrologic alteration is relatively significant with a mean hydrologic alterations (HA) value of 0.51. The values of ecological flow at the Meigang Station are within the RVA threshold that can basically maintain steady river flow to safeguarding river ecological security. However, the values of ecological flow on five months including Feb., Jul., Aug., Sep. and Dec. exceeded the lower limit of RVA value. Measures should be implemented such as increasing the amount of water discharged from reservoir in order to reduce the threat to downstream river ecosystems.

**Key words:** indicator of hydrological alteration; range of variability approach; hydrological regime; Xinjiang River Basin

(上接第 14 页)

## Probabilistic Ensemble Precipitation Forecasting Based on Bayesian Model Averaging for Daduhe River Basin

ZHONG Yixuan<sup>1</sup>, WU Yuzhen<sup>2,3</sup>, WANG Dagang<sup>2,3</sup>, KONG Dongdong<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China; 2. Department of Water Resources and Environment, Sun Yat-Sen University, Guangzhou 501275, China; 3. Key Laboratory of Water Cycle and Water Security in Southern China of Guangdong High Education Institute, Guangzhou 501275, China)

**Abstract:** Bayesian Model Averaging (BMA) probability forecast models for the Daduhe River Basin was established by calibrating model parameters with precipitation ensemble forecasts and gauge observations. The ensemble forecasts used in this study consists of five single-center predictions from the following five agencies: the China Meteorological Administration (CMA), the Canadian Meteorological Center (CMC), the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF), the United States National Center for Environmental Prediction (NCEP) and the United Kingdom Meteorological Office (UKMO) in the THORPEX Interactive Grand Global Ensemble (TIGGE). Evaluation based on continuous ranked probability score (CRPS), mean absolute error (MAE) and Brier Score (BS) shows that the BMA models are better than the original probability forecast models. The averages of CRPS and MAE of the BMA models decrease by 31.6% and 23.9%, respectively. By analyzing BMA model weights of each single-center prediction, we find that ECMWF contributes most for the models, which means ECMWF does best in precipitation forecasts in the Daduhe basin. The BMA models for the Daduhe basin does not perform well for the prediction of extreme precipitation and usually underestimate the precipitation amount.

**Key words:** Daduhe River Basin; precipitation probabilistic forecast; BMA; ensemble forecast